This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

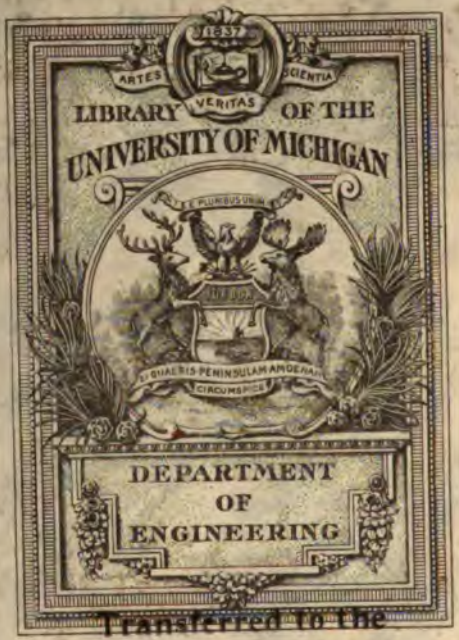
+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`



Transferred to the
GENERAL LIBRARY.

GEN. LIBRARY.

TS
460
.C67

Ouvrage couronné par la Société des Anciens Élèves
des Écoles nationales d'Arts et Métiers, dans sa séance du 17 février 1895
présidée par M Félix Faure, Président de la République
et extrait du *Bulletin technologique (1896)*

PROCÉDÉS
DE
FORGEAGE
DANS L'INDUSTRIE

PAR

C. CODRON

INGÉNIEUR CIVIL
Professeur du cours des Arts mécaniques à l'Institut Industriel du Nord
Officier d'académie

PARIS

E. BERNARD et Cie, IMPRIMEURS-EDITEURS

53 ter, Quai des Grands-Augustins, 53 ter

1897

PROCÉDÉS

DE

FORGEAGE DANS L'INDUSTRIE

Ouvrage couronné par la Société des Anciens Élèves
des Écoles nationales d'Arts et Métiers, dans sa séance du 17 février 1895,
présidée par M. Félix Faure, Président de la République
et extrait du *Bulletin technologique* (1896)

PROCÉDÉS

DE

FORGEAGE

DANS L'INDUSTRIE

PAR

C. CODRON

INGÉNIEUR CIVIL
PROFESSEUR DU COURS DES ARTS MÉCANIQUES A L'INSTITUT INDUSTRIEL DU NORD
OFFICIER D'ACADÉMIE

PARIS

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIELLE DES ARTS ET MANUFACTURES

E. BERNARD & Cie

53 *ter*, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS

1896

A la mémoire de M. Lucien ARBEL;

A Messieurs Antoine et Pierre ARBEL, maîtres des forges de Couzon, à Rive-de-Gier;

A vous qui avez été les inspirateurs de ce travail;

Hommage de l'auteur,

C. CODRON.

Cet ouvrage est un extrait de notre mémoire présenté au Concours Arbel, ouvert par la Société des Anciens Élèves des Écoles nationales d'Arts et Métiers, sur les procédés de forgeage dans l'industrie, et publié dans le *Bulletin technologique.*

Nous avons pensé qu'il pouvait être utile d'en faire une édition pour le public qui s'intéresse aux arts mécaniques, pour ceux qui s'occupent de l'enseignement de ces arts utilitaires entre tous.

Les procédés de mise en œuvre des métaux industriels ont pris une telle extension à notre époque, ils sont si variés que leur étude complète devrait comporter plusieurs gros volumes.

Mais ces procédés, qui paraissent indépendants, peuvent être coordonnés et divisés en deux classes qui

230194

se distinguent nettement par le mode d'action des outils. Ce sont :

1° Les procédés qui modifient la forme, sans enlèvement de matière;

2° Les procédés qui opèrent par enlèvement de matière.

La première classe fait l'objet de cette étude, qui comprend deux parties distinctes:

Dans la première, nous considérons les procédés de forgeage à un point de vue général. Nous les méthodisons d'après le genre d'action des outils : par *pression*, par *traction*, par *flexion*, par *torsion* ou par plusieurs de ces actions combinées.

Nous avons été amené à faire de multiples essais pour analyser les opérations de façonnage dans les limites des déformations permanentes ordinaires, pour évaluer les efforts développés et les énergies nécessaires, de manière à pouvoir en discuter, tant par la théorie que par l'expérience, les avantages ou les inconvénients.

Nous sommes entré, sur chaque procédé, dans des détails suffisants pour rendre accessible aux hommes de métier les différentes considérations théoriques qui relient les arts mécaniques à la science mécanique.

Nous indiquons les divers moyens de mise en œuvre des métaux à froid ou à chaud par pression lente ou vive, et les applications telles que : la compression, le martelage, le pilonnage, le refoulage, l'estampage, le matriçage, le soudage, le rivetage, le cisaillage.

Les divers modes de laminage intermittent ou continu forment un chapitre étendu, de même que l'étirage au mandrin filière, qui a pris une si grande importance

en ces dernières années. Puis, viennent les opérations de courbage, de ployage, de cintrage, d'emboutissage, etc.; l'étude de ces procédés est complétée par les dessins des outils et machines-outils employés.

Cette première partie constitue un véritable cours où les professeurs, les élèves des écoles techniques trouveront des aperçus nouveaux sur la plupart des questions traitées et dont quelques-unes même n'avaient pas encore été exposées. Telles sont la compression centrifuge, l'étirage au mandrin, le cintrage, le filetage à chaud, etc. On y trouve également quelques données nouvelles sur le laminage longitudinal, transversal et hélicoïdal.

Dans la deuxième partie, les questions théoriques ont été écartées pour ne s'attacher qu'aux procédés particuliers d'application, aux méthodes suivies dans la transformation des matières brutes en produits commerciaux, en objets fabriqués de formes plus ou moins complexes utilisés dans les constructions métalliques de tout ordre. Nous considérons en détail les premières manipulations des masses métalliques brutes, paquets ou lingots; puis l'obtention des barres simples ou profilées, verges, fils, tôles simples, nervurées ou ondulées; les pièces de taillanderie et de ferronnerie telles que bêches, pelles, fourches, faux, ranchers, étriers, fers à cheval, outils divers; les objets de clouterie, de visserie, de boulonnerie. Viennent ensuite les organes de machines tels que : arbres, essieux, leviers, bielles, manivelles, rails, roues et bandages; les chaînes, les ressorts, boîtes à ressorts, tampons.

Les divers procédés de fabrication des tuyaux, des

récipients forment l'objet d'un important chapitre ainsi que les engins de défense : armes à feu, canons, projectiles, plaques de cuirassement. Ces diverses fabrications spécialisées, dont nous ne donnons qu'une énumération succincte, sont également traitées d'une manière méthodique, en signalant la plupart des procédés consacrés par la pratique, en montrant les transformations progressives et en joignant de nombreux dessins des outils en usage dans les divers pays métallurgiques.

Nous nous sommes efforcé d'indiquer tout particulièrement les machines de forgeage les plus récentes; entre autres, celles qui mettent à contribution l'énergie électrique pour le chauffage de la pièce au moment où elle se façonne.

La variété et l'importance qu'ont prises les engins de travail dans les grandes forges modernes et dans les industries tributaires des procédés sans enlèvement de matière, motivent suffisamment un traité spécial de *l'art du forgeron* dont les applications se multiplient et se perfectionnent sans cesse.

Nous avons confiance qu'un tel ensemble sera favorablement accueilli par les maîtres de forges, les ingénieurs, les professeurs, les élèves des écoles techniques et par les chefs d'industries se rattachant aux arts mécaniques.

C. Codron.

PROCÉDÉS

DE

FORGEAGE DANS L'INDUSTRIE

A travers les âges de l'industrie, l'outil de forgeage le plus simple, le plus puissant, le plus universel a été et est encore le marteau.

Avant-propos.

L'envergure de la question du premier concours Arbel nous a obligé à la traiter d'une façon très générale. On ne saurait, d'ailleurs, signaler tout ce qui se fait actuellement dans le domaine immense des procédés métallurgiques.

Le but principal étant le procédé et l'outil proprement dit, nous avons écarté de multiples éléments qui présentaient pourtant un intérêt relatif; nous avons dû apporter une excessive sobriété dans les descriptions des machines d'exécution signalées. On conçoit qu'au point de vue du procédé lui-même, il importe peu d'entrer dans le détail des dispositions mécaniques des engins utilisés dans les forges.

Nous avons, le plus scrupuleusement possible, signalé l'origine des documents qui figurent dans ce travail. Nous eussions voulu également indiquer celle de quantité d'observations personnelles faites dans nos visites d'établissements métallurgiques; mais le caractère du concours ainsi que le caractère général de cette étude nous ont obligé à quelques réserves à ce sujet.

Procédés de forgeage.

Un procédé d'exécution est une manière d'opérer pour obtenir un objet de forme et de dimensions déterminées.

Dans l'exécution d'un objet, il faut considérer :

1° La matière qui constitue l'objet;

2° La forme primitive du corps et sa forme finale;

3° L'outil ou les outils qui concourent à l'exécution et leur mode d'action.

Les procédés de forgeage s'appliquent aux matières ductiles et malléables, aux métaux industriels tels que le plomb, le zinc, le cuivre, le laiton, l'aluminium, le fer, l'acier, etc.

La matière ne spécifie pas le procédé d'exécution, mais le procédé peut et doit même varier suivant les propriétés des matériaux mis en œuvre.

Au point de vue des propriétés du métal, on peut opérer à des températures différentes correspondant à l'état solide, pâteux, liquide. L'opération se fait, ainsi qu'on le dit pratiquement : à froid ou à chaud. Ordinairement, tout procédé de forgeage est supposé devoir recourir au chauffage préalable du métal ; or, des procédés anciens ou nouveaux permettent de modeler, de transformer les formes, les dimensions, à froid comme à chaud, de sorte que la condition de travail à chaud ne saurait définir le procédé général. Cependant, le travail à chaud est une caractéristique qui a toujours une très grande importance dans le travail du forgeron (1).

Les métaux se forgent généralement à l'état solide ou pâteux, exceptionnellement à l'état liquide. Les procédés pour façonner le métal à l'état liquide ont été essayés depuis un certain nombre d'années. Ils présentent des difficultés assez grandes lorsque la température de fusion est élevée; ils ne sont encore adoptés que

(1) *Forger*, c'est battre sur l'enclume un *métal* avec un marteau. On forge à froid et à chaud, mais plus souvent à chaud. Ce mot varie d'acception. (Définition de l'*Encyclopédie*, t. VII, p. 168.)

dans quelques cas. Il est à présumer qu'avec l'emploi de plus en plus répandu du fer fondu, ce sont des procédés que l'avenir emploiera parallèlement aux autres.

A notre époque, les pièces étant le plus souvent en cuivre, en fer, en acier, nous ne signalerons qu'accidentellement les procédés se rapportant au plomb et au zinc. Tous ces procédés ayant, d'ailleurs, la plus grande analogie entre eux, tout ce qui se rapporte à l'un de ces métaux est ordinairement applicable aux autres.

La forme n'est pas suffisante, non plus, pour déterminer, à elle seule, le procédé. Un embouti peut être obtenu au marteau, au mandrin ou en matrices sous pression. Néanmoins, la pratique désigne cette mise en œuvre sous le nom de procédé d'emboutissage, de même qu'elle désigne les opérations de cintrage, de ployage, de rivetage, en se basant sur la forme de la pièce.

Lorsque cette forme est complexe, il faut recourir à divers procédés; dans ce cas, c'est elle qui synthétise l'ensemble des procédés.

Il en est de même de l'outil et de l'effort qui l'actionne, puisque la même pièce peut être obtenue par des outils différents à action variable également. Ainsi, on donne le nom de procédé de martelage à l'exécution pour laquelle le marteau joue le rôle principal.

Il importe peu que le marteau soit mû à la main ou par la puissance de la vapeur, de l'eau, de l'air sous pression.

Cependant, on indique que la pièce est obtenue par un procédé manuel ou par un procédé mécanique.

Le mode d'action de l'outil, le mouvement qu'il possède peuvent aussi servir à spécifier le procédé. Un outil peut opérer par pression lente, par percussion ou pression vive, par traction directe, par pression avec traction ou flexion, par torsion, etc., ou en développant simultanément plusieurs de ces actions mécaniques. L'outil peut être animé d'un mou-

vement rectiligne, ou de rotation, agir d'une façon intermittente ou continue.

Nous reconnaissons donc qu'aucun de ces éléments ne saurait, à lui seul, permettre de classer les procédés, et que l'opération est définie, le plus souvent, par l'élément prépondérant.

Les remarques ci-dessus se rapportent aux arts mécaniques en général. Si nous voulons limiter le domaine de l'art du forgeron étendu à la mise en œuvre des métaux modernes, il faut rechercher une marque particulière. Or, on peut remarquer que, par les procédés de forgeage, on obtient des pièces complètement achevées, ou des pièces dites brutes de forge qui doivent être parachevées avec plus de précision par d'autres procédés de travail, par des outils qui donnent les dimensions définitives en entamant la matière, en enlevant une partie de la masse sous forme de *copeaux*, tandis qu'avec les procédés de forgeage, ce n'est qu'exceptionnellement que l'on enlève de la matière pour obtenir la forme.

Il s'ensuit qu'ils comprennent la catégorie des procédés généraux des *arts mécaniques*, façonnant les pièces *sans enlèvement de matière*.

C'est la caractéristique qui nous servira de guide et de limite.

Opérations de mise en œuvre des métaux sans enlèvement de matière.

Les principales opérations de mise en œuvre des métaux sans enlèvement de matière sont les suivantes :

Allonger, aplanir, braser, battre, canneler, cingler, cintrer, compresser, contracter, courber, couder, dresser, étendre, emboutir, enrouler, étirer, étamper. estamper, forger, fileter, laminer, moulurer, marteler, mandriner, matter, matricer, penter, planer, platiner, profiler, plier, ployer, presser, refouler, retreindre ou restreindre, riveter ou river, relever, rouler, sertir, souder, tirer, tomber, tordre, tailler, tremper.

Ces opérations se font à l'aide d'outils tels que : marteaux, tas, formes, mandrins, étampes, bouterolles, matrices, cylindres, etc.

Ces outils sont indépendants, ou sont les éléments les plus importants de la machine avec laquelle ils sont combinés. Le point essentiel de cette étude étant l'outil, le procédé, les considérations sur le transmetteur de l'action motrice *seront très écourtées.*

Une classification méthodique des outils et des opérations de forge ne saurait guère être établie rationnellement.

Puisqu'il est possible d'obtenir une même forme avec différents outils, et réciproquement, avec un même outil, produire diverses formes, on pourrait indifféremment prendre pour base d'une classification les formes ou les outils.

Il conviendrait de ne considérer d'abord que les formes simples géométriques, en les prenant pour bases des opérations au moyen des divers outils connus. C'est à la forme que l'on rapporterait le procédé d'exécution.

Au point de vue pratique, c'est ainsi que l'on opère : une arme est imposée par des conditions de construction, et c'est en considérant cette forme et les dimensions de la pièce, que l'on choisit tel ou tel outil, celui-ci se transformant, s'il y a lieu, pour opérer le mieux possible.

Mais, avant de choisir l'outil, de le faire agir, il convient d'en connaître la valeur, le pouvoir. D'autre part, les outils sont en petit nombre, tandis que les formes sont variables à l'infini. De plus, l'action de l'outil est ordinairement simple; les facteurs peu nombreux de cette action, peuvent plus aisément servir à classer un petit nombre de procédés généraux qu'il est utile de développer en premier lieu.

Ce sera l'objet de la première partie de cette étude; dans une deuxième partie, nous considérerons les procédés d'exécution des formes plus ou moins complexes que présentent les multiples objets des constructions métalliques, des machines,

les pièces de ferronnerie, de taillanderie, d'outillage, les engins de défense, en ne citant que les applications principales, sinon, si l'on ne se bornait pas, il faudrait plusieurs gros volumes.

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE PREMIER

I. — Procédés généraux d'action des outils.

Les outils agissent généralement par pression directe sur toute la surface de la pièce ou sur une partie de la surface; ils agissent aussi par traction directe, par flexion ou par torsion et, souvent, plusieurs de ces efforts se produisent simultanément.

Ces divers modes d'action donnent lieu à des déplacements, des glissements des molécules dont le groupement final dépend de la forme de l'outil et du mouvement relatif que possèdent l'outil et la pièce.

Les différentes opérations de forgeage, de travail sans enlèvement de matière, peuvent se classer comme l'indique le tableau n° 1, en prenant pour base l'action de l'outil déterminant: une *pression*, une *traction*, une *flexion*, une *torsion*, ou une combinaison de ces efforts.

II. — Procédés par pression directe continue sur toute la surface ou compression.

Dans le travail par compression directe, lente, continue, s'exerçant sur toute la surface, on se propose d'augmenter l'homogénéité du métal, de rapprocher ses molécules.

Le métal est contenu dans un moule résistant, l'outil est un plongeur de presse agissant sur une partie de la surface de la masse, ou sur les parois du moule de manière à transmettre la pression dans toutes les parties de la masse métallique. Si

Classification des procédés de forgeage.

Tableau n° 1.

MODE D'ACTION DE L'OUTIL	MOUVEMENT RELATIF DE L'OUTIL ET DE LA PIÈCE	OPÉRATIONS CORRESPONDANTES
Pression directe sur toute la surface, lente ou vive, continue ou intermittente	rectiligne alternatif ou oscillant, ou rotatif	compresser ou comprimer.
Pression directe sur une partie de la surface, continue ou intermittente	rectiligne alternatif ou oscillant, circulaire, spiraloïdal, hélicoïdal,	presser, pétrir, cingler, mâqueter, pilonner, marteler, étirer ou allonger, platiner, battre, parer, chasser, refouler, mandriner, tuber, sertir, étamper, matricer, riveter, mater, repousser, souder, braser, percer ou poinçonner, couper, cisailler, fendre, découper, scier, tailler. laminer, rouler, profiler, fileter.
Traction directe	rectiligne,	étirer, redresser, tirer, tréfiler, moulurer, profiler, régulariser.
Flexion	rectiligne ou circulaire,	courber, ployer, redresser, couder, plier, canneler, cintrer, décintrer ou dresser, enrouler, border, retreindre, sertir, estamper, emboutir, moulurer, contourner, canneler.
Torsion	circulaire,	tordre.
Chauffage et refroidissement	arbitraire, variable,	déformer, tremper, recuire.

celle-ci est à l'état visqueux presque liquide et tend à devenir spongieuse en se refroidissant, une pression suffisamment énergique aura pour effet de favoriser le retrait, de resserrer les molécules, de réduire le volume des bulles de gaz, d'empêcher la formation des soufflures, des cavités intérieures.

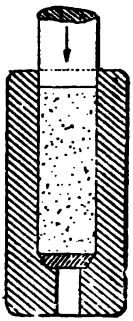
Le procédé de compression à l'état liquide pâteux est tout

moderne (1). Il tend à s'appliquer, de plus en plus, aux lingots d'acier fondu pour pièces de résistance telles que : canons, frettes, arbres d'hélice, bandages.

Il est aussi appliqué pour l'amélioration de la qualité du cuivre, du bronze, du laiton, du plomb, du zinc.

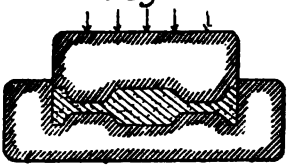
En principe, on opère dans une lingotière cylindrique fermée à l'un des bouts *(fig. 1)*; l'autre bout est ouvert et emboîte le plongeur qui comprime le métal encore liquide en faisant échapper les gaz qui se dégagent de la masse.

Fig. 1



La compression directe s'applique aussi au métal solide porté au rouge cerise s'il s'agit de fer ou d'acier, et sur des pièces coulées telles que les roues de wagons à toile pleine. L'effort s'exerce, soit sur la totalité de la surface, soit partiellement et successivement sur les différentes parties lorsqu'il est nécessaire d'agir énergiquement avec un engin plus ou moins puissant. On obtient ainsi une amélioration des propriétés du métal, particulièrement si l'opération se répète. L'action de l'outil s'exerce par l'intermédiaire de l'une des parties du moule *(fig. 2)*.

Fig. 2



La compression à haute température est encore utilisée pour souder les pièces de fer ou pour assurer la liaison des parties soudées. On sait que des particules de métal peuvent être agglutinées, soudées à froid de manière à former un métal homogène en les soumettant à des pressions énergiques atteignant :

(1) Ce procédé a été essayé à Saint-Étienne, chez MM. Bietrix et Cie, vers 1865; puis vers 1870 par Joseph Whiteworth et Cie, à Manchester, où il est appliqué régulièrement pour tous les gros lingots.

Pour le plomb, 20^{kg} par millimètre carré;
Pour l'étain, 30^{kg} —
Pour le zinc, 50^{kg} —
Pour le cuivre, 60^{kg} —

Enfin, on comprime aussi à froid des petites pièces de fer, d'acier, de plomb, de zinc, de cuivre, etc., dont on veut augmenter la dureté de la surface.

Efforts de compression.

La compression est d'autant plus efficace et exige un effort d'autant plus faible que le métal se trouve plus près de l'état liquide. Ainsi, du fer ou de l'acier liquide se comprime aisément sous la pression de 0^{kg},1 par millimètre carré; il faut au moins 5^{kg} lorsque la masse est pâteuse, 20 à 30^{kg} au rouge cerise, 60 à 100^{kg} à la température ordinaire.

Le plomb à l'état pâteux, température voisine de 300°, n'exigera qu'une pression de 0^{kg},05 par millimètre carré pour le déplacement de ses molécules; à la température ordinaire, la pression doit être de 2 à 4^{kg} pour produire une action utile.

La compression est efficace si, prolongée, l'intensité atteint les valeurs du tableau suivant déduites d'essais divers et d'exemples d'une bonne pratique:

Tableau n° 2.

NATURE DU MÉTAL	TEMPÉRATURES EN DEGRÉS CENTIGRADES										
	0°	100°	200°	300°	400°	500°	600°	1000°	1200°	1400°	1600°
Acier ordinaire . .	80	»	»	»	»	»	60	40	10	4	»
Fer soudé ou fondu.	60	»	»	»	»	»	40	30	10	8	3
Cuivre	30	»	»	»	»	»	25	10	2	»	»
Laiton	50	»	»	»	»	»	30	10	2	»	»
Zinc	15	»	10	8	5	1	»	»	»	»	»
Plomb	4	3	2	0,2	»	»	»	»	»	»	»

En opérant sur des pièces d'acier dont la surface d'action serait de 1^{m²}, il faudrait développer des pressions pouvant

varier de 4.000.000^{kg} à 80.000.000^{kg}. Ces chiffres montrent qu'il faut agir lorsque le métal est liquide ou pâteux, sinon l'opération devient impraticable pour les grosses pièces de fer, d'acier, de cuivre.

Énergie de compression.

Il est difficile d'estimer le travail mécanique dépensé pour la compression d'une pièce ; les éléments sont très variables pendant l'opération.

Le phénomène simple, si le métal restait liquide, devient complexe dès que la masse est pâteuse ou solide, dès que la masse chauffée se refroidit. Dans le cas d'un liquide, en supposant le frottement des parois négligeable et en admettant que les pressions se transmettent uniformément dans la masse et sur les enveloppes supposées indéformables, l'intensité de l'effort à exercer est proportionnelle à la surface d'action de l'outil compresseur et le travail mécanique est proportionnel à la réduction de volume obtenu.

Si on considère un prisme de dimensions a, $b = ma$; et $c = m'a$; m et m' étant plus grands que l'unité ; si p est la pression par unité superficielle supposée constante, et $\frac{1}{k}$ le coefficient de réduction du volume V, les pressions sur chacune des faces inégales seront :

$$abp = ma^2p, \qquad acp = m'a^2p, \qquad bcp = mm'a^2p.$$

Afin de réduire l'effort moteur, il faut faire agir l'outil sur la plus petite face du prisme.

En ce qui concerne le travail mécanique, il serait le même quelle que soit la face qui reçoit l'action de l'outil ; on a pour expression de ce travail :

$$T = abp \times \frac{c}{k} = acp\,\frac{b}{k} = bcp\,\frac{a}{k} = \frac{mm'a^3p}{k} = \frac{Vp}{k}.$$

Soit, par exemple, un lingot d'acier pour lequel

$a = 0{,}20$, $b = 2a = 0{,}40$, $c = 10a = 2$, $p = 4.000.000^{kg}$ par mètre carré, $\frac{1}{k} = \frac{1}{10}$.

Les pressions motrices seraient pour chacune des faces ; sur face (ab), 320.000^{kg} ; sur face (ac), $1.600.000^{kg}$ sur face (bc) $3.200.000^{kg}$.

Le travail de l'outil serait

$$\frac{Vp}{k} = \frac{0{,}160 \times 4.000.000}{10} = 64.000^{kgm}.$$

Dans ces calculs, nous n'avons pas considéré la vitesse d'action de l'outil ; nous la supposons assez faible pour n'avoir pas à tenir compte des effets de l'inertie. Constatons que la compression de l'acier, dans les conditions ci-dessus, exige une puissance mécanique de 400^{kgm} par décimètre cube.

Dans le cas d'un métal pâteux-solide, le frottement prenant une grande valeur sur les parois, les pressions ne se distribuent plus aussi uniformément. Les parties recevant l'action immédiate de l'outil se compriment d'abord, se déplacent en premier lieu, l'effort croît pour vaincre des résistances croissant avec l'état de compression du métal et avec l'augmentation des frottements.

Nous admettrons, pour simplifier le problème, que dans chaque tranche normale à la direction de l'effort s'exercent des pressions moyennes égales entre elles, que le déplacement de l'outil compresseur se répartit uniformément sur toute la longueur du prisme, de sorte que le travail total est une somme de travaux élémentaires variant suivant la loi de l'effort total.

Cet effort total équilibrera : 1° les résistances de compression des molécules du métal ; 2° les résistances de glissement sur les parois du moule.

Suivant que l'effort s'exercera longitudinalement sur une face d'about, ou transversalement sur l'une des faces latérales, la résistance de glissement aura une importance plus ou moins

grande, une influence qu'on ne saurait négliger au point de vue du travail minimum.

L'effort total a une variation qui peut être représentée par la courbe ABC *(fig. 3)*.

La résistance de glissement suit une loi de variation analogue AEF.

Les travaux de ces forces seraient proportionnels aux surfaces ABCD, AEFD, lorsque AD est le déplacement de l'outil.

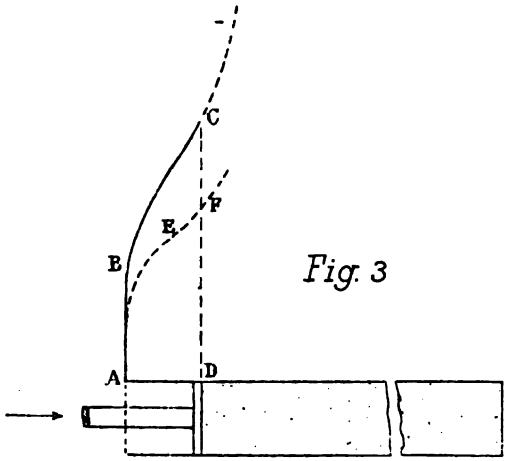


Fig. 3

p étant la pression moyenne, pf la résistance moyenne de glissement, les efforts totaux de glissement seront, en considérant les trois cas d'application de l'effort sur chacune des faces inégales du prisme et en admettant, par exemple, que $p = 10\,000\,000^{kg}$ par mètre carré et que le coefficient de frottement $f = 0{,}2$; soit $pf = 2.000.000^{kg}$.

$2(a+b)cpf = 2(0{,}20+0{,}40)\times 2^{m},00\times 2.000.000 = 4.800.000^{kg}$;
$2(a+c)bpf = 2(0{,}20+2{,}00)\times 0^{m},40\times 2.000.000 = 3.620.000^{kg}$;
$2(b+c)apf = 2(0{,}40+2{,}00)\times 0^{m},20\times 2.000.000 = 1.920.000^{kg}$.

Les efforts de compression intérieurs auraient pour valeur :

1° $abp = 0{,}20 \times 0{,}40 \times 10.000.000 = 800.000^{kg}$;
2° $acp = 0{,}20 \times 2.00 \times 10.000.000 = 4.000.000^{kg}$;
3° $bcp = 0{,}40 \times 2.00 \times 10.000.000 = 8.000.000^{kg}$:

De sorte que les efforts totaux seraient respectivement :

1° $4.800.000 + 800.000 \ldots\ldots 5.600.000^{kg}$;
2° $3.620.000 + 4.000.000 \ldots\ldots 7.620.000^{kg}$;
3° $1.920.000 + 8.000.000 \ldots\ldots 9.920.000^{kg}$.

Les travaux respectifs seraient, en admettant une réduction de 1/10 ;

1° $5.600.000 \times \frac{2.00}{10} \ldots\ldots\ldots 1.120.000^{kgm}$;

2° $7.620.000 \times \frac{0{,}40}{10} \ldots\ldots\ldots 304.800^{kgm}$;

3° $9.920.000 \times \frac{0{,}20}{10} \ldots\ldots\ldots 198.400^{kgm}$.

Ces chiffres montrent l'importance que peut prendre le frottement des parois; ils indiquent qu'au point de vue du minimum d'énergie, l'outil doit agir dans le sens de la plus faible dimension du prisme. On conçoit que si on voulait comprimer un prisme de grande longueur dans le sens longitudinal, le frottement des parties supérieures équilibrerait une pression motrice déterminée, et les parties inférieures ne seraient pas comprimées. Il y a donc une limite de longueur à ne pas dépasser afin que la pression ne soit pas exagérée et se développe dans la masse entière à peu près graduellement.

L'excès de pression sur la partie supérieure du prisme est très favorable lorsque cette partie présente de nombreux défauts d'homogénéité, ainsi que cela se produit dans les lingots d'acier coulés debout.

Afin d'éviter le contact de la tête d'un piston hydraulique avec le métal et permettre de presser toutes les faces d'un lingot au moment de la solidification, on fait agir la pression par l'intermédiaire d'un gaz. On attribue à cette compression une

bonne répartition dans toute la masse du métal, sans exclusion des parties encore liquides et une plus grande garantie contre la porosité de retrait.

Ce procédé est parfois préféré, pour les lingots d'acier, à celui de compression directe auquel on reproche la formation autour du piston de pression, d'une croûte, dont la résistance, croissant avec la solidification, peut augmenter au point d'empêcher toute action sur les couches centrales encore demeurées à l'état liquide. D'autre part, la compression avec piston ne peut s'opposer complètement à la porosité de retrait du métal qui présente, dans la partie supérieure du lingot, des petites soufflures assez nombreuses qui portent même certains métallurgistes à n'avoir qu'une médiocre confiance dans l'utilité de ce procédé. Cependant à la suite d'essais comparatifs faits en 1885 à l'usine Oboukoff en Russie, on fut amené à donner la préférence au procédé direct, en comprimant l'acier à l'état liquide et à l'état solide sous des charges de 4 à 5^{kg} par millimètre carré.

III. — Compression centrifuge.

En faisant tourner rapidement une masse de métal liquide dans un récipient, il se développe des pressions centrifuges qui préviennent les soufflures et resserrent les molécules.

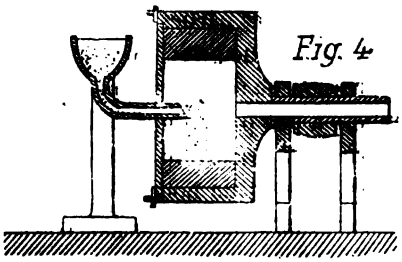


Fig. 4

Ce procédé a été appliqué par M. Grand (1) pour des manchons de plomb coulés dans une lingotière montée sur un arbre horizontal *(fig. 4)*. Il peut être avantageusement adopté pour les ébauches de pièces annulaires en cuivre, laiton, fer, acier. Il n'est pratique

(1) Brevet du 2 avril 1850.

qu'avec des vitesses non exagérées ; il est efficace si la force centrifuge agit avec une intensité suffisante, quand le métal est à l'état liquide ou pâteux.

La pièce étant maintenue sur son pourtour par la lingotière, les actions centrifuges ne déterminent que des pressions suivant les rayons, sans traction circonférencielle, et donnent lieu à des réactions normales aux parois.

Les pressions qu'il convient de développer peuvent s'estimer par la relation générale de la force centrifuge appliquée, soit aux masses élémentaires voisines des surfaces extérieures et intérieures de l'anneau, s'il est mince, soit à la masse entière, s'il comporte une certaine épaisseur suivant le rayon.

Dans le premier cas, on peut considérer simplement une masse cubique de $0^m,001$ de côté, de densité δ, située à une distance de r ou r' du centre de rotation et poser la relation :

$$f = \frac{mv^2}{r} = \frac{PV^2}{gr}.$$

Ce sera la force centrifuge sur l'élément unitaire intérieur tournant à la vitesse V. Par exemple, pour du plomb de densité $\delta = 11400$, la vitesse V étant de 30^m, le rayon intérieur étant $0^m,250$, on aurait pour un cube de 1^{mm} de côté, une pression par millimètre carré :

$$f = \frac{0,000.000.001 \times 11400 \times \overline{30^2}}{9,8 \times 0,250} = 0^{kg},0042,$$

valeur montrant bien qu'elle ne produirait pas d'effet sur le plomb à l'état solide à la température ordinaire, attendu que ce métal exige, pour obtenir une déformation à froid, une pression de $0^{kg},5$ au moins par millimètre carré.

Pour une vitesse de 60 mètres, qui n'a rien d'anormal avec les dispositions mécaniques actuelles que l'on peut réaliser, et pour du fer ou de l'acier fondu, en admettant un rayon intérieur de $0^m,50$, la pression centrifuge serait, en prenant $\delta = 7.700^{kg}$,

$$f = \frac{PV^2}{gr} = \frac{0,0000077 \times 3600}{9,8 \times 0,500} = 0^{kg},0056 \text{ par millimètre carré.}$$

Le nombre de tours de la lingotière serait d'environ 1.200 par minute.

Pressions exercées par la masse entière sur son pourtour. — Les différentes pressions qui s'exercent sur les molécules composant une file dirigée suivant le rayon, s'ajoutent pour développer une pression maximum sur les éléments de pourtour ou de contact avec la lingotière, qui est supposée indéformable et réagit contre lesdites pressions. Leur estimation peut se faire en considérant un élément de volume $ydxdyl$ situé entre deux rayons faisant un angle da et à une distance y de l'axe de rotation, l étant la largeur de l'anneau.

La force centrifuge développée sur cet élément est

$$dxylyl\delta\,\frac{v^2}{gy} = dxydyl\delta \times \frac{4\pi^2 y l^2}{3.600g} = \frac{\pi^2 l\delta l^2}{900g}\,dxy^2dy.$$

La somme de toutes ces forces élémentaires étendue à l'anneau entier de rayon extérieur r et de rayon intérieur r' sera :

$$F = \frac{\pi^2 l\delta l^2}{900g}\int_0^{2\pi} da \int_{r'}^{r} y^2dy = \frac{2\pi^2 l\delta l^2}{900g}\left(\frac{r^3 - r'^3}{3}\right).$$

Le métal étant supposé liquide, la pression centrifuge totale se répartit uniformément sur la surface d'appui extérieure $2\pi rl$, de sorte que la pression par unité de surface est :

$$p = \frac{2\pi^2 l\delta l^2}{2\pi rl \times 900g}\left(\frac{r^3 - r'^3}{3}\right) = \frac{\pi^2\delta l^2}{900gr}\left(\frac{r^3 - r'^3}{3}\right) = \frac{\omega^2\delta}{gr}\left(\frac{r^3 - r'^3}{3}\right).$$

Appliquons cette relation à un anneau de laiton de densité $\delta = 8.500$, de rayon $r = 0{,}190$, de rayon $r' = 0{,}150$, de largeur $l = 0{,}090$, tournant à 600 tours par minute; soit

$\omega = \dfrac{3{,}14 \times 600}{30} = 62^{m},80$ et $\omega^2 = 3.944$; on trouve :

$$p = \frac{3.944 \times 8.500}{9{,}8 \times 0{,}190}\left(\frac{\overline{0{,}190}^3 - \overline{0{,}150}^3}{3}\right) = 20.850^{kg}$$ par mètre carré, soit $0^{kg}{,}02$ par millimètre carré.

Or, en considérant un élément cubique de 1^{mm} de côté, sup-

posé isolé, à proximité de la paroi extérieure, la force centrifuge développée serait

$$\frac{PV^2}{gr} = \frac{8.500 \times 0{,}000.000.001\,(62{,}80 \times 0{,}190)^2}{9{,}0 \times 0{,}190} = 0^{kg}{,}000{,}6$$

seulement, ce qui montre bien l'influence de l'épaisseur $(r-r')$ de l'anneau.

La pression à proximité de la surface intérieure de l'anneau serait déduite du rapport $\frac{f}{f'} = \frac{r}{r'}$, soit :

$$\rho' = \frac{fr'}{r} = \frac{0{,}000.6 \times 0{,}150}{0{,}190} = 0^{kg}{,}000.47,$$

valeur beaucoup plus faible que la pression $p = 0{,}02$ ci-dessus. La vitesse du pourtour étant seulement $\omega r = 62{,}80 \times 0{,}190 = 11^{m}{,}93$, on pourrait facilement l'augmenter pour produire des pressions plus élevées donnant un meilleur résultat. Cette application se rapporte aux dimensions et vitesses adoptées par M. Montain, à Castleford (Yorkshire) pour des anneaux de laiton qui sont ensuite laminés, puis découpés en fils. Les parois du moule sont enduites d'un mélange d'huile et de charbon, à l'effet d'éviter l'adhérence du métal. Après refroidissement suffisant, les effets de la contraction permettent de retirer aisément l'anneau, qui peut d'ailleurs être disposé en dépouille.

En considérant l'anneau d'acier de 0,50 de rayon intérieur et de 0,70 de rayon extérieur tournant à 1.200 tours, la pression maximum sur l'élément de pourtour serait :

$$p = \frac{\omega^2\delta}{gr}\left(\frac{r^3 - r'^3}{3}\right) = \frac{15.775 \times 7.700}{9{,}8 \times 0{,}70}\left(\frac{0{,}70^3 - 0{,}50^3}{3}\right) = 1.293.100^{kg}$$

par mètre carré, soit $1^{kg}{,}29$ par millimètre carré, tandis que vers la partie intérieure de l'anneau, nous avons trouvé une pression de $0^{kg}{,}0056$.

On voit que le procédé de pression centrifuge a le défaut de ne développer que des pressions très faibles sur les parties intérieures de l'anneau.

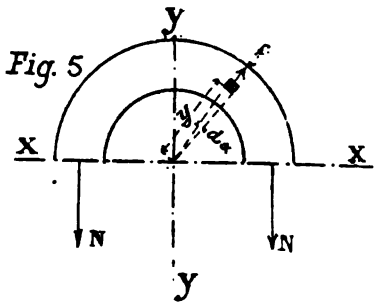
La lingotière peut être disposée avec axe vertical; la pièce prend alors extérieurement la forme intérieure de la paroi du

moule, tandis que la surface intérieure de l'anneau a pour profil un arc de parabole.

Effet de la contraction.

La contraction se manifestant alors que la rotation continue, dès que le diamètre extérieur devient plus petit que le diamètre de la lingotière, il se détermine dans les diverses sections diamétrales de l'anneau des tensions non uniformément réparties, mais dont les résultantes N pour chaque section peuvent s'estimer très approximativement en considérant les différentes forces centrifuges f appliquées aux éléments $yd\alpha dyl$ de la pièce.

Fig. 5



Si l'anneau est coupé suivant le plan diamétral xx *(fig. 5)*, l'équilibre étant rétabli par l'indication des deux forces extérieures N, les projections de toutes les forces f et N sur l'axe yy donneront la relation

$$2N - \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} f \cos \alpha = 0.$$

Or $$f = \frac{\pi^2 l\delta l^2}{900g} d\alpha y^2 dy$$

soit $$2N = \frac{\pi^2 l\delta l^2}{900g} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos \alpha d\alpha \int_{r'}^{r} y^2 dy = \frac{\pi^2 l\delta l^2}{900g} \left(2\right) \left(\frac{r^3 - r'^3}{3}\right)$$

ou encore $$N = \frac{\omega^2 l\delta}{g} \left(\frac{r^3 - r'^3}{3}\right).$$

L'effort de traction moyen dans chaque section $S = (r - r')$, sera $$R = \frac{N}{S} = \frac{\omega^2 \delta}{g} \left(\frac{r^3 - r'^3}{3(r - r')}\right).$$

Cet effort est sensiblement plus grand que les pressions suivant le rayon.

On avait trouvé pour la pression maximum de pourtour :

$$p = \frac{\omega^2 \delta}{gr}\left(\frac{r^3 - r'^3}{3}\right),$$

soit donc $\frac{R}{p} = \frac{r}{r - r'}$, et $R = p\frac{r}{r - r'}$.

Dans l'exemple numérique relatif au laiton, on aurait

$$R = \frac{0{,}02 \times 190}{190 - 150} = 0^{kg},095,$$

soit $0^{kg},1$ par millimètre carré, valeur suffisante pour agrandir le diamètre de l'anneau, le métal étant à l'état pâteux et ayant subi une chute de température d'environ 200° donnant lieu à une contraction diamétrale approximativement égale à

$$2 \times 0{,}001868 \times 0{,}380 = 0^{m},0014.$$

On conçoit que pendant la période de passage du métal de la liquidité à la solidité, il se produit des phénomènes de contraction contre-balancés par les effets centrifuges qui agrandissent ou tendent à agrandir l'anneau, et dont il est difficile d'analyser les résultats.

Nous retrouverons l'application des relations précédentes dans le laminage héliçoïdal à grande vitesse.

Énergie de compression centrifuge. — L'énergie dépensée pour porter la masse de l'anneau à la vitesse maximum prolongée peut s'estimer en totalisant les énergies absorbées par les masses élémentaires définies ci-dessus sous la forme $dM = \frac{y d\alpha dy \delta l}{g}$. Chaque masse dM partant de la vitesse zéro pour prendre la vitesse $V = \omega y$ exige une énergie

$$\frac{dMV^2}{2} = \frac{y d\alpha dy l\delta}{g} \cdot \frac{\omega^2 y^2}{2} = \frac{\omega^2 l\delta}{2g} d\alpha y^3 dy.$$

L'énergie totale exigée par la masse entière M de l'anneau sera exprimée par la relation :

$$T = \frac{\omega^2 ld}{2g}\int_0^{2\pi} d\alpha \int_{r'}^{r} y^3 dy = \frac{2\pi\omega^2 l\delta}{2g}\left(\frac{r^4 - r'^4}{4}\right)$$

$$= \frac{\pi\omega^2 l\delta}{g}\left(\frac{(r^2 + r'^2)(r^2 - r'^2)}{4}\right);$$

or, le poids total $P = \pi(r^2 - r'^2)l\delta$,

soit $$T = \frac{P\omega^2}{g}\left(\frac{r^2 + r'^2}{4}\right) = M\omega^2\left(\frac{r^2 + r'^2}{4}\right).$$

La rotation étant maintenue pendant un certain temps, et les autres masses en mouvement étant indéterminées, on ne peut estimer l'énergie qu'elles exigent; il faut s'en tenir au travail utile.

En appliquant l'expression du travail à l'anneau de laiton, on aurait : $P = \pi(r^2 - r'^2)l\delta = 3,14(0,\overline{190}^2 - 0,\overline{150}^2)$ $0,690 \times 8500 = 32^{kg},67$, soit

$$T = \frac{P}{g}\omega^2\left(\frac{r^2 + r'^2}{4}\right) = \frac{32,67 \times 3944}{9,8}\left(\frac{0.0361 + 0,0225}{4}\right) = 193^{kgm}.$$

On voit que l'énergie de compression centrifuge n'est relativement pas très élevée, et que ce procédé est économique au point de vue du rendement mécanique.

Aux aciéries de Nykroppa en Suède (1), on a tiré parti, depuis deux ans, de la compression centrifuge, en disposant les lingotières verticalement, chacune sur une plate-forme articulée, supportée par une armature solidaire d'un arbre vertical. Quand l'arbre est au repos, les lingotières restent dans la position verticale; puis, quand l'arbre tourne avec une vitesse de plus en plus grande, les lingotières s'inclinent progressivement jusqu'à devenir horizontales.

La vitesse est réglée de manière à développer une pression trente fois plus forte que celle due à la colonne du métal en fusion contenu dans la lingotière, ce qui suffit pour obtenir des lingots sains.

En supposant un lingot de 1^m de hauteur, la pression par millimètre carré serait donc :

$$p = 0^{m^2},000001 \times 1^m,00 \times 7700 \times 30 = 0^{kg},231,$$

valeur assez élevée nécessitant une grande vitesse, si elle est supposée se développer sur les molécules les plus voisines de l'axe de rotation.

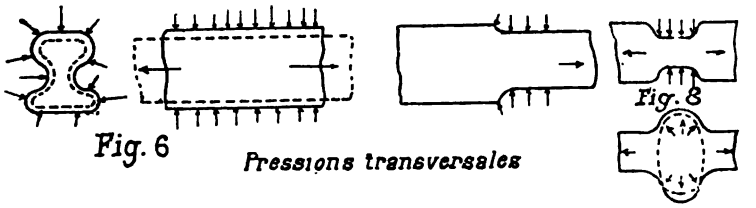
(1) *Revue industrielle* du 3 février 1894.

IV. — Procédés par pressions partielles transversales.

Les pressions partielles s'exercent sur les métaux à l'état solide, sur les pièces non enveloppées de toutes parts.

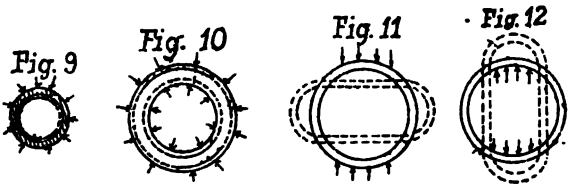
Suivant les directions des pressions appliquées à une pièce, celle-ci se déforme de différentes façons, la matière se déplaçant sur les côtés libres, dans les directions où elle rencontre le moins de résistance.

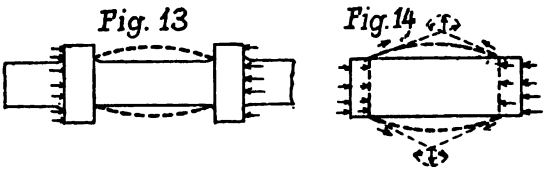
Si la pièce est pressée sur tout le pourtour de sa surface latérale *(fig. 6)*, sa section diminue, et sa longueur augmente. Une telle pression, rapproche les molécules des parties pressées et améliore les qualités du métal.



Pressions transversales

Le plus souvent les pressions ne s'exercent que sur une faible





partie de la surface latérale *(fig. 7)* et c'est successivement que l'on atteint toutes les parties de la pièce, pour l'allonger, l'étirer.

Lorsque la pression se produit sur une partie seulement du pourtour *(fig. 8)* en même temps que la partie s'allonge, elle s'aplatit; le métal se déplaçant plus ou moins latéralement; on transforme ainsi la section à volonté.

Une pièce à section annulaire pressée sur tout son pourtour se réduit en diamètre et sa paroi augmente d'épaisseur *(fig 9)* l'allongement étant relativement faible. Pressée extérieurement et intérieurement *(fig. 10)*, elle s'allonge. Ces déformations sont partielles si ces pressions le sont aussi, et dans le cas de pressions opposées, la pièce s'aplatit *(fig. 11, 12)*.

Pressions longitudinales.

Une pièce libre sur sa surface latérale et pressée dans le sens longitudinal se raccourcit, les parties comprimées augmentant de section *(fig. 13)*. C'est le procédé de refoulage. La déformation ou renflement est d'autant plus prononcé, relativement, que la section transversale est plus faible; par exemple, quand on opère sur une pièce de section variable; et cela se conçoit facilement puisque la pression par unité de surface est plus élevée sur une petite section que sur une grande. Si la section est constante, les pressions s'appliquant sur les abouts, c'est la section du milieu qui se renfle le plus *(fig. 14)*, en admettant que la pièce soit pleine, et soit un prisme court ne fléchissant pas.

Les sections des abouts recevant l'application des efforts de pression par l'intermédiaire de pièces rigides, il se développe au contact une adhérence qui empêche, dans une certaine mesure, le déplacement des molécules voisines des faces d'about; les fibres de métal s'obliquent par rapport à la direction longitudinale suivant laquelle s'exercent les efforts.

Cette obliquité ou flexion des fibres donne lieu à des composantes de forces obliques également et à des composantes transversales qui ont pour effet d'écarter les fibres du centre

vers le pourtour. Et comme cette flexion latérale est maximum au milieu de la longueur de la pièce; c'est en ce point que le renflement s'accuse le plus, le profil restant symétrique.

En supposant même qu'il n'y ait pas de frottement sur les abouts, la forme serait encore renflée au milieu, car les extrémités ne sauraient s'élargir que par entraînement latéral produit par les parties voisines qui se sont déjà inclinées, parties sur lesquelles les forces latérales dues aux molécules centrales ont une action prépondérante.

Influence de l'épaisseur de la pièce et de l'étendue de la surface pressée.

On peut remarquer que pour un même raccourcissement des pièces de même section, mais de hauteur différente, donnent lieu à des déformations plus ou moins accusées. Une pièce longue *(fig. 15)* pourra conserver sensiblement sa forme cylindrique, dont le diamètre aura peu varié.

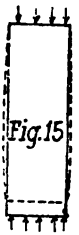


Fig.15

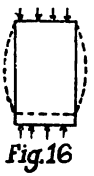


Fig.16

Fig.17

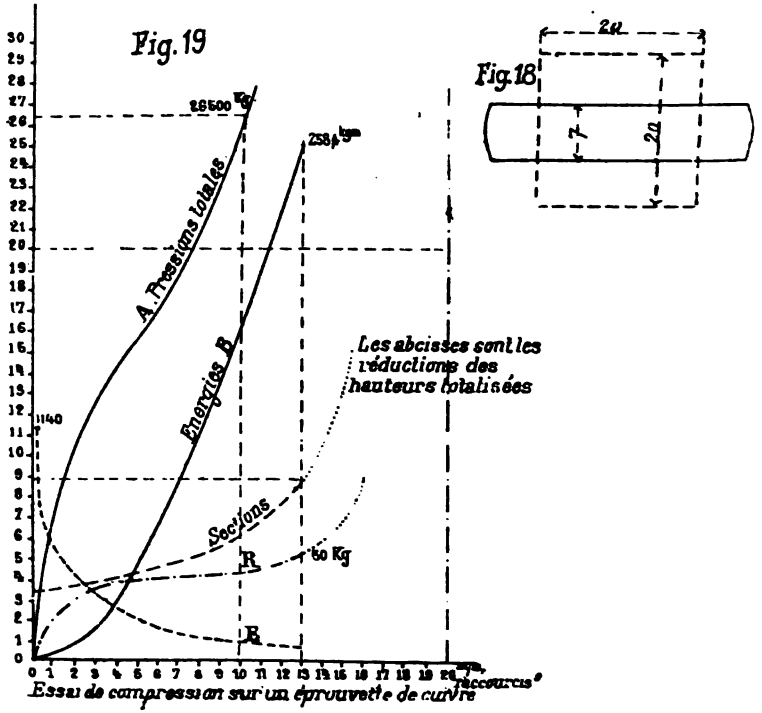
Une pièce de longueur moyenne *(fig. 16)* prendra une forme renflée de diamètre maximum au milieu. Une pièce courte *(fig. 17)* accusera un renflement très prononcé.

On conçoit donc, que si le métal est homogène, s'il résiste à peu près également aux déformations dans toutes directions, s'il est isotrope, il faudra de plus grands efforts pour produire la déformation du cylindre court que pour produire celle du cylindre long; il faudra plus d'énergie, pour un même raccourcissement, avec le court qu'avec le long.

Les déformations n'étant pas semblables ne sauraient être comparables; mais elles indiquent l'influence de l'épaisseur de la pièce lorsque celle-ci, libre latéralement, est soumise à des pressions opposées sur les bases.

Essais de compression.

Pour bien se rendre compte de l'importance, de l'épaisseur, de l'étendue de la surface pressée et pour estimer la variation des pressions, il faut procéder à des essais simples, tels que ceux consistant à comprimer des éprouvettes cylindriques avec une machine à essayer.



Signalons les suivants :

Essai d'une éprouvette de cuivre. — Le *tableau n° 3* ci-contre donne les éléments d'un essai de cuivre à froid. L'éprouvette de 20^{mm} de hauteur a été pressée sur ses faces d'about. La pression de début, donnant lieu à une déformation sensible avec les instruments de mesure ordinaires, soit $0^{mm},1$, s'élève à $5^{kg},7$ par

millimètre carré, tandis que, pour continuer l'aplatissement avec une épaisseur réduite à 10^{mm}, il faut 42^{kg} et avec une épaisseur réduite à 7^{mm} *(fig. 18)*, il faut 50^{kg} par millimètre carré. L'épure *(fig. 19*, courbe R) montre la variation de ces efforts et celle des sections moyennes successives rapportées à un volume constant.

Pour les divers métaux comprimés à froid nous avons trouvé les chiffres moyens suivants :

	Plomb	Cuivre	Laiton	Fer	Acier doux
Éprouvette de 20^{mm} de diamètre sur 20^{mm} de hauteur réduite de 1^{mm}.	$0^{kg},8$	30	50	50	60
Même éprouvette réduite à 10^{mm} de hauteur.	$1^{kg},3$	42	80	80	100
Même éprouvette réduite à 5^{mm} de hauteur. .	$2^{kg},7$	70	140	150	180

On conçoit que si l'épaisseur est très réduite, le frottement qui s'exerce sur les bases et qui s'oppose aux déplacements latéraux est relativement grand, et que la pression directe doit atteindre une valeur excessive sans produire de résultat appréciable, surtout si la surface pressée est grande.

C'est pourquoi le procédé de pression sur toute la surface ne saurait être appliqué aux minces épaisseurs pour les réduire encore; par exemple, la pratique ne comprime pas une tôle sur toute sa surface pour l'amincir; il faudrait une pression formidable. Ainsi, sur un mètre carré de surface, en admettant une tôle de fer au rouge et une pression par millimètre carré de 30^{kg}, il faudrait 30 millions de kilogrammes. La plus forte presse qui existe ne produit que 14 millions de kilogrammes. La réduction des faibles épaisseurs ne peut se faire que partiellement, par opérations répétées, par la presse ou le marteau, ou par opérations continues ou intermittentes avec le laminoir.

Un essai de compression sur une éprouvette cylindrique tel que celui du *tableau n° 3* montre la loi de progression de l'effort total représentée par la courbe A de l'épure *(fig. 19)* dont les abscisses sont les raccourcissements et dont les ordonnées sont les efforts.

Essai de compression sur une éprouvette de cuivre.

Tableau n° 3.

DÉSIGNATION ET MARQUES DE L'ÉPROUVETTE	DIMENSIONS			RÉDUCTIONS OU AUGMENTATIONS						CHARGES		Réduction pour 100 de la hauteur primitive i	Coefficient de raccourcissement relatif $E = \frac{R}{l}$	ÉNERGIES DE COMPRESSION	
				DES HAUTEURS		DES DIAMÈTRES		DES SECTIONS							
	Hauteurs h	Diamètres d	Sections S	partielles	totalisées	partielles	totalisées	partielles	totalisées	totales P	par mmq de sect. $R = \frac{P}{S}$			partielles	totalisées
Éprouvette cylindrique de cuivre recuit	20	20	314	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	19,9	20	315	0,1	0,1	0	0	1	1	1.800	5,7	0,005	1.140	»	»
	19,75	20,1	318	0,15	0,25	0,1	0,1	3	4	3.000	9,4	0,0125	750	»	»
	19,5	20,3	322	0,25	0,5	0,2	0,3	4	8	4.600	14,3	0,025	572	1,2	1,2
	19	20,5	331	0,5	0,1	0,2	0,5	9	17	7.000	21,1	0,05	421	3,2	4,4
	18	21,1	348	1	2	0,6	1,1	17	34	10.600	30,4	0,10	304	9,2	13,6
	17	21,7	369	1	3	0,6	1,7	21	55	12.400	33,7	0,15	225	11,5	25,1
Les sections S' sont déduites de la relation $S' = S\frac{h}{h'}$	16	22,3	392	1	4	0,6	2,3	23	78	14.200	36,2	0,20	181	13,3	38,4
	15	23,1	418	1	5	0,8	3,1	26	104	15.800	37,7	0,25	151	15	53,4
	14	23,9	449	1	6	0,8	3,9	31	135	17.300	38,5	0,30	128	16,5	69,9
	13	24,8	483	1	7	0,9	4,8	34	169	19.000	39,3	0,35	112	18,1	88
	12	25,9	525	1	8	1,1	5,9	42	211	21.000	40	0,40	100	20	108
	11	27	571	1	9	1,1	7	46	257	23.200	40,5	0,45	90	22	130
	10	28,3	628	1	10	1,3	8,3	57	314	26.500	42,2	0,50	84	25	155
	9	29,8	698	1	11	1,5	9,8	70	384	31.300	45	0,55	82	28,8	183,8
	8	31,6	785	1	12	1,8	11,6	87	471	37.300	47,5	0,60	80	34	217,8
	7	33,8	898	1	13	2,2	13,8	113	584	45.000	50	0,65	77	40,6	258,4

Il s'ensuit que, pour obtenir l'énergie mécanique dépensée pour produire une déformation ou un raccourcissement d'abscisse x, il suffit de faire la somme $\int_0^x f(y)dx$.

On obtient ainsi la courbe d'énergie B.

Remarquons que ces courbes ont une ordonnée de grandeur infinie pour l'abscisse égale à la hauteur de la pièce, ce qui suppose une épaisseur réduite à zéro. Cela montre bien l'impraticabilité de réduire les minces épaisseurs en opérant sur de grandes surfaces.

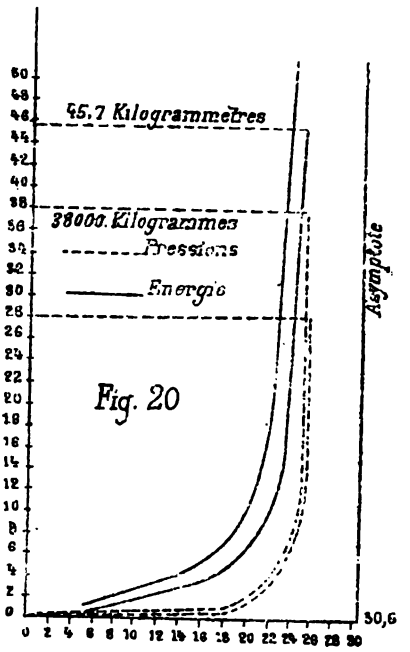


Fig. 20

Influence de la vitesse.

Les efforts de compression et, par suite, l'énergie dépensée, varient aussi avec la vitesse d'application des pressions, avec la vitesse de l'opération. C'est un point dont il convient de faire ressortir l'importance par des essais comparatifs en opérant avec une même machine ou presse à essayer, et sur des éprouvettes identiques.

Le *tableau n° 4* donne les éléments de compression de deux éprouvettes de plomb à des vitesses variables, c'est-à-dire, en opérant pour chaque période de l'essai à une vitesse quinze fois plus grande, les vitesses relatives pour les divers raccourcissements étant cependant variables.

L'épure *(fig. 20)* fait ressortir les différences des résultats :

Essais de compression comparatifs à vitesse variable.

Tableau n° 4.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	RACCOURCISSEMENTS	ALLURE ASSEZ RAPIDE		ALLURE TRÈS LENTE		OBSERVATIONS
		Charges	Énergie	Charges	Énergie	
			kgm.		kgm.	
Éprouvettes cylindriques de plomb.	0	»	»	»	»	La durée totale de l'essai à allure rapide a été de 18 min.
	0,5	210		160		
	1	290		230		
Diamètre : 18mm,2	2	350		260		La durée totale de l'essai à allure lente a été de 4 heures 12 minutes.
Hauteur : 30mm,6	3	390		280		
	4	430		290		
	5	430		280		
	6	440		290		
	7	440		300		
	8	440		310		
	9	450		320		
	10	470	2,3	330	1,7	
	11	490		340		
	12	520		350		
	13	540		350		
	14	580		350		
	15	610		350		
	16	650	5,2	450	3,6	
	17	850		520		
	18	1.150	7	640	4,6	
	19	1.500		860	6,3	
	20	1.800	10	1.100		
	21	2.200		1.460		
	22	3.000	14,7	2.050	9,5	
	23	4.000	18,6	3.000	12	
	24	5.800	23,5	4.200	16	
	25	8.800	30,6	6.700	20,5	
	26	15.300	46	10.800		
	27	28.000	67	22.500	45,7	
	27,5	38.000		23.000		

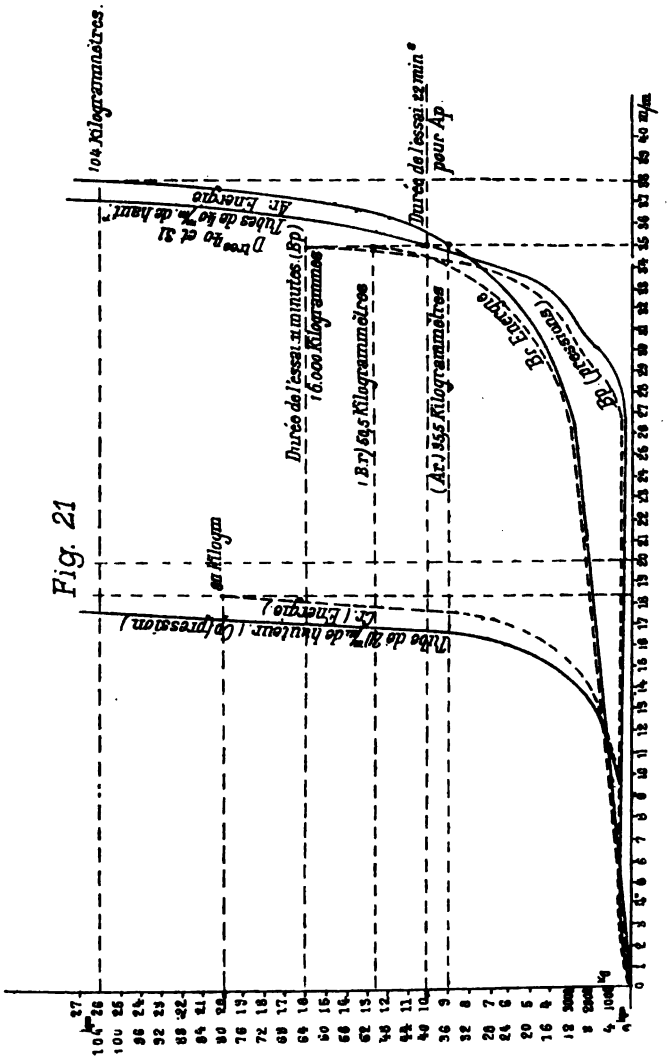


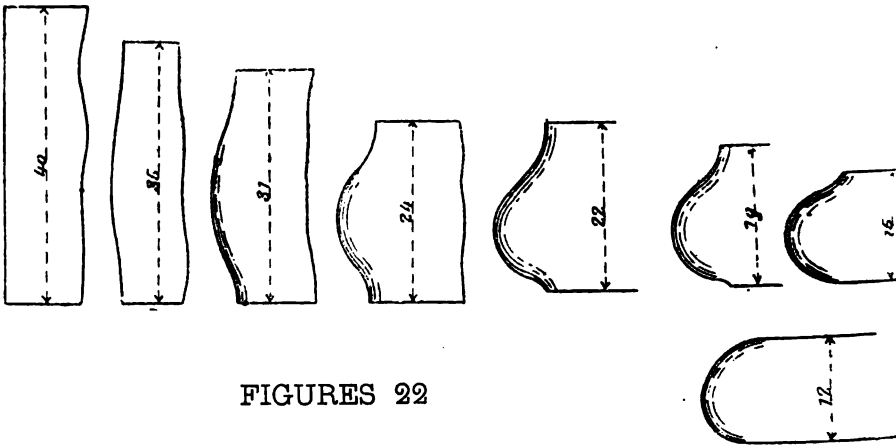
Fig. 21

On constate que les efforts augmentent avec la vitesse, que pour une vitesse quinze fois plus grande, l'augmentation des

efforts est assez sensible dans le cas considéré. Le rapport des énergies reste sensiblement constant et égal à 1,5.

On conçoit que les forces de cohésion des molécules, les forces d'inertie développent une résistance variable dans le même sens que la vitesse. Il s'ensuit que, pour une même déformation correspondant à un raccourcissement déterminé de l'éprouvette, l'énergie mécanique est plus grande quand la vitesse croît.

Sur les métaux à température constante, il convient donc



FIGURES 22

d'opérer lentement si on cherche à réduire la dépense d'énergie. Mais, pour les métaux chauffés à haute température, celle-ci s'abaissant rapidement pendant l'opération, et la résistance du métal à la déformation, faible au début, mais devenant très grande si le métal est refroidi, il faut opérer vivement, sinon le travail nécessaire deviendrait plus élevé.

En opérant sur des tubes de plomb de 40^{mm} de hauteur, diamètre extérieur 40^{mm}, diamètre intérieur 31^{mm}, et la vitesse deux fois plus rapide pour un essai que pour l'autre, on obtient les résultats des tableaux n° 5 et 6 et les courbes A_p, B_p de l'épure *(fig. 21)*.

Essais de compression directe sur des tubes de plomb.

Tableau n° 5.

DÉSIGNATION et MARQUES DE L'ÉPROUVETTE	CHARGES totales successives	RACCOURCISSEMENTS	ÉNERGIE DÉPENSÉE	OBSERVATIONS
		mm.		
	80	0,25		*(Voir figures 22.)*
	180	0,50		
Tube de plomb (A)	370	1		Le bourrelet se dessine.
	450	2		
Dimensions :	520	3		Le bourrelet s'accentue.
	580	4		
Hauteur . . 40mm	610	5		Le bourrelet s'accentue de plus en plus.
	630	6		
Diamètre extérieur . . 40mm,1	630	7		
	610	8		Le bourrelet s'affaisse.
Diamètre intérieur . . 31mm	615	9		
	590	10	4	Le bourrelet touche sur les deux faces.
Section. . . 571mm²	590	11		
	590	12		
Charges par millimètre carré de section au début	580	13		Durée de l'essai à 35mm : 22 minutes.
	575	14		
	575	15		
$\frac{80}{571} = 0^{kg},14,$	555	16		Durée totale de l'essai : 34 minutes. L'éprouvette est aplatie en s'ovalisant, il n'y a plus trace de trou.
	560	17		
	555	18		
$\frac{180}{571} = 0^{kg},315,$	555	19	8	
	555	20		
	540	21		
$\frac{370}{571} = 0^{kg},65.$	540	22		L'énergie a été calculée en établissant le diagramme des pressions en prenant pour abscisses les raccourcissements et en faisant successivement les sommes de $T_z = \int_0^z f(p\,dx)$
	535	23		
	530	24		
	540	25		
	545	26		
	565	27	12	
	850	28		
	1.500	29	14	
	2.250	30		
	2.900	31	17	
	4.000	32	20	
	5.100	33	23,5	
	7.600	34	28,5	
	9.500	35	35,5	
	15.000	36	48	
	20.000	36,5		
	26.500	37	66	
	32.000	37,25		
	35.000	37,50	80	
	44.000	38	104	

Essais de compression directe sur des tubes de plomb.

Tableau n° 6.

DÉSIGNATION et MARQUES DE L'ÉPROUVETTE	CHARGES totales successives	RACCOURCISSEMENTS	ÉNERGIE DÉPENSÉE	OBSERVATIONS
		mm.		
		0,25		
	90	0,50		
Tube de plomb (B)	180	1		
	440	2		
Dimensions :	530	3		Le bourrelet se dessine.
	600	4		
Hauteur . . 40mm	630	5		
Diamètre extérieur. . 40mm1	700	6		
	710	7		
Diamètre intérieur. . 31mm	650	8	4	
	630	9		Le bourrelet se prononce nettement.
Section. . . 571mm	620	10		
	620	11		
	620	12		
	610	13		Le bourrelet s'accentue fortement.
	605	14		
	590	15		
	580	16		
	550	17	8	
	540	18		Le bourrelet s'affaisse.
	540	19		
	555	20		
	530	21		
	525	22		
	530	23		
	535	24		
	540	25		
	550	26	12	Les parties droites tendent à disparaître.
	565	27		
	900	28	14	
	1.600	28,5		
	2.000	29	15	Les parties droites n'existent plus.
	2.600	29,5		
	3.000	30	17,5	
	3.900	31	20,5	La durée de l'essai a été de 11 minutes.
	4.500	31,5		
	4.950	32	24	
	5.700	32,5		
	9.400	33	29	
	9.700	34	38	
	11.000	34,5		
	13.000	34,75		
	16.000	35	50,5	

Les différences d'énergies et de pressions sont encore nettement caractérisées, mais moins grandes que dans les essais qui précèdent. Les écarts restent sensiblement constants dans la période de l'essai jusqu'à 25^{mm}, puis au delà ils s'accusent davantage.

Essais de compression directe sur des tubes de plomb.

Tableau n° 7.

DÉSIGNATION et MARQUES DE L'ÉPROUVETTE	CHARGES totales successives	RACCOURCISSEMENTS	ÉNERGIE DÉPENSÉE	OBSERVATIONS
	520	1		
Tube de plomb (C).	680	2		
	760	3		
Dimensions :	770	4		
Hauteur. . . 20^{mm}	780	5		
	790	6		
Diamètre extérieur. . . 40^{mm}	810	7		
	840	8		
Diamètre intérieur. . . 31^{mm}	940	9		
	1.180	10	5	
	1.540	11		
	2.200	12		
	2.500	13		
	3.500	14		
	5.500	15	17	Durée de l'essai à ce point : 8 minutes.
	10.200	16	24	
	17.000	16,5		
	22.000	17	37	
	31.000	17,5		
	40.500	18	61	Durée totale de l'essai : 20 minutes.
	45.000	18,3	80	

On peut remarquer qu'avec une éprouvette tubulaire de ces dimensions, l'effort reste sensiblement constant pendant la déformation qui correspond à la formation du bourrelet par flexion de paroi. Dès que le bourrelet est complètement affaissé,

l'aplatissement proprement dit commence et l'effort s'élève rapidement.

Le tableau n° 7 donne les éléments de compression pour une éprouvette de hauteur moitié ou de 20^{mm}, et l'épure (courbes C_p et C_r) fait bien ressortir l'influence de la hauteur sur les résultats des essais, qui ne sont comparables que si l'on opère sur des éprouvettes identiques.

Importance des hautes températures.

La question de température est particulièrement importante dans les travaux de forgeage à chaud des métaux à l'état solide; il suffit de considérer que du fer, sous forme d'éprouvette d'épaisseur donnée, doit être soumis à une pression de 40^{kg} par millimètre carré si on opère à froid, température 15 à 20°, tandis qu'en le comprimant à la température de 500° la pression se réduit à 3½^{kg}; à la température de 1000°, la pression n'est plus que 12^{kg}; à la température de 1400 à 1500°, la pression est 4^{kg}; elle devient pour ainsi dire égale à zéro vers 1600 à 1700°. Ces chiffres se rapportent à des éprouvettes dont la hauteur est égale au diamètre; ils ont été déduits d'essais faits à vitesse aussi grande que possible pour permettre de mesurer les efforts (1), alors que la température était encore sensiblement uniforme, condition assez difficile à réaliser, attendu que les surfaces de contact, les parties avoisinant les bases se refroidissent très rapidement, ce qui est un grand inconvénient pour l'emploi de la presse dans la confection des pièces peu épaisses.

Les essais sur des éprouvettes chauffées aux températures correspondant aux diverses couleurs du métal, bien distinctes, donnent pour les dimensions (20^{m} de hauteur, 20^{mm} de diamètre) les éléments du *tableau n° 8.*

(1) Avec la machine à essayer du type Delaloe, dont nous nous sommes servi, les efforts se mesuraient automatiquement.

Résistance à la déformation par compression des métaux forgés à différentes températures. (Les valeurs indiquées ne sont que relatives à des pièces cylindriques réduites à environ la moitié de la hauteur à une vitesse assez lente.)

Tableau n° 8.

NATURE DU MÉTAL	TEMPÉRATURES											
	0°	100°	200°	300°	400°	500°	600°	700°	800°	1000°	1200°	1400°
Acier ordinaire fondu .	50	50	49	48	47	44	40	36	28	18	8	0
Fer soudé	40	40	39	38	37	34	30	25	20	12	8	4
Laiton	40	39	38	36	34	30	26	22	16	5	»	»
Cuivre.	30	30	29	28	25	22	18	12	8	4	»	»
Zinc.	10	9	7	3	0,5	»	»	»	»	»	»	»
Plomb.	3	2	1	0,1	»	»	»	»	»	»	»	»

Ces essais, faits avec une approximation relative, ont été répétés sur un assez grand nombre d'éprouvettes et dans des conditions variant peu.

Les divers métaux considérés donnent des variations analogues représentées par les courbes de l'épure *(fig. 23)*. Il

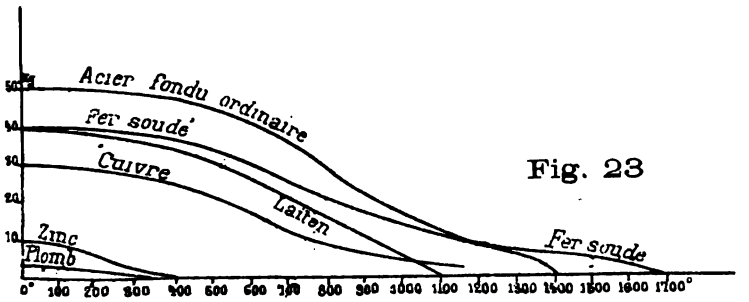
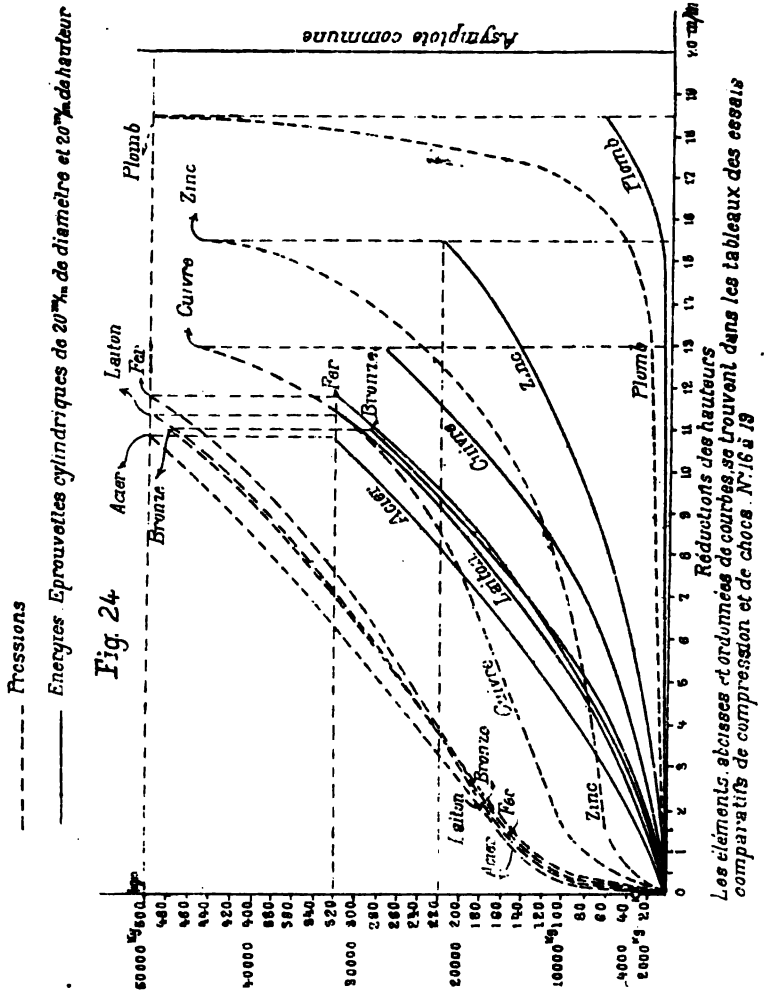


Fig. 23

ne faut pas perdre de vue que les valeurs des ordonnées sont toutes relatives, et qu'en opérant sur des éprouvettes dissemblables et à des vitesses différentes, les résistances peuvent varier dans des limites très étendues.

Énergie de compression des divers métaux.



Il est également intéressant de comparer le travail mécanique à dépenser par pression pour des éprouvettes identiques de métaux différents. Il suffit de considérer l'épure *(fig. 24)*

sur laquelle nous avons rapporté les courbes de pression et celles d'énergie pour l'acier, le fer, le cuivre, le bronze, le laiton, le zinc, le plomb pressés à froid.

Il est assez curieux de remarquer que le fer, le laiton, le bronze, donnent des courbes de pression et, par suite, d'énergie très peu différentes. Dans les réductions au delà de 6^{mm}, le fer résiste moins bien, les éprouvettes de fer se criquent plus que celles de laiton et de bronze, mais ces dernières donnent lieu parfois à une rupture brusque.

La courbe des pressions de l'acier s'éloigne peu de celles du laiton et du bronze; nous avons même obtenu pour certains aciers, des courbes qui se confondaient; nous avons choisi l'une de celles qui s'en écartaient sensiblement.

Les éprouvettes d'acier se criquent beaucoup sur le pourtour.

La courbe des pressions du cuivre, très régulière, montre que ce métal est très ductile; les criques de pourtour sur les éprouvettes, n'étaient pas visibles à l'œil.

De même le zinc se déforme bien régulièrement et prend place entre le cuivre et le plomb, métal possédant au plus haut point la malléabilité et la ductilité sous faible résistance. A la courbe des pressions du plomb, on peut, par analogie, rapporter les courbes des autres métaux portés à haute température et possédant encore une grande malléabilité. Ces courbes pour le fer et l'acier se tiendraient entre celle du cuivre et celle du plomb, suivant le degré de température.

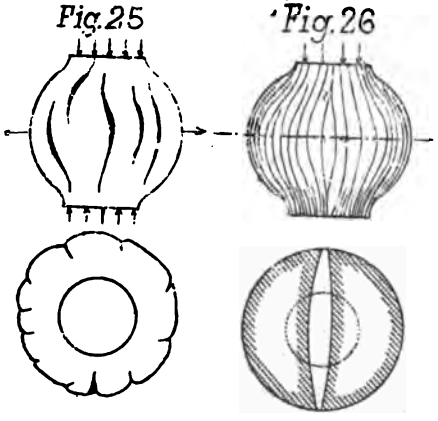
Importance de la ductilité.

Les déformations des éprouvettes montrent qu'avec un métal très malléable et en même temps très ductile, comme le plomb, on peut, sans inconvénients, produire de fortes réductions d'épaisseurs déterminant des allongements circonférentiels ou de surface de plus de 400 0/0. Mais, avec des métaux tels que le fer fibreux, les réductions prononcées pro-

duisent ou tendent à produire des criques extérieures qui se propagent, des déchirures intérieures provenant de l'écartement des parties qui fléchissent, comme *figures 25-26*. Ces déchirures sont particulièrementà craindre lorsque le métal est peu ductile, ne s'allonge pas par entraînement latéral. Il convient donc de modérer les déformations partielles; il est préférable de les répéter en opérant alternativement sur les faces opposées, s'il s'agit, par exemple, d'une section carrée, de manière à contre-balancer les effets d'écartement pouvant donner lieu à des déchirures.

On reconnaît ainsi que dans les travaux de forgeage, la propriété essentielle des métaux doit être la ductilité.

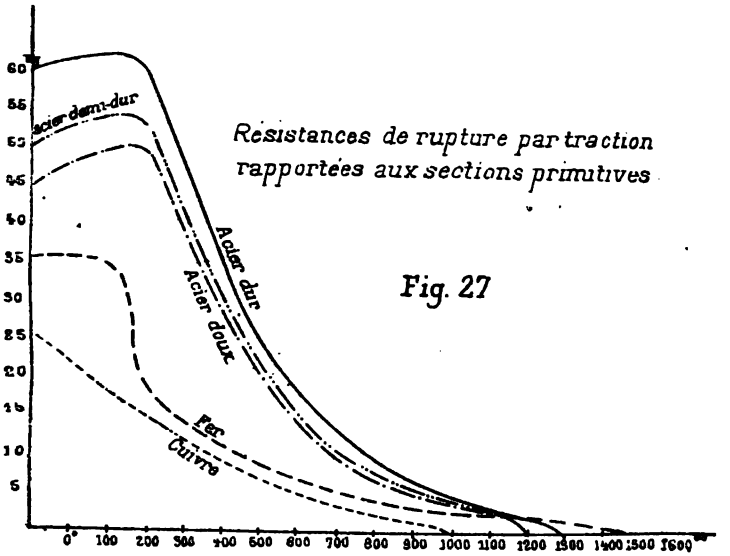
La malléabilité ne vient qu'en seconde importance, attendu qu'un métal peut être très mou et ne posséder que peu de ductilité, ce qui ne permet même pas de le comprimer partiellement sans déterminer l'émiettement.



Le forgeron doit se rendre compte de la ductilité aux diverses températures. Il convient de compléter les diagrammes des variations de résistance de compression, par ceux relatifs à la ductilité. Ordinairement, cette propriété est caractérisée par l'importance de la striction dans la section de rupture des éprouvettes de traction, et le coefficient de striction représenté par le rapport $\frac{s'}{s}$ de la section de rupture s' à la section primitive s peut servir pour exprimer le degré de ductilité

en prenant le complément $1 - \frac{s'}{s}$ de ce rapport, de sorte que plus ce complément est grand, plus la ductilité est grande.

Nous ne pouvons signaler ici les divers éléments des essais de ductilité que nous avons faits avec des éprouvettes de diamètre variant de 3 à 10^{mm}, et qui nous ont conduit à déterminer d'abord les résistances à la traction à différentes températures, de façon à pouvoir repérer rapidement les températures



Résistances de rupture par traction rapportées aux sections primitives

Fig. 27

des éprouvettes de ductilité que l'on rompait sous charge déterminée variable, en les chauffant dans une flamme ou dans un four. Ces deux méthodes combinées donnaient ainsi des résultats qui se complétaient et dont nous signalons les moyennes sous forme de diagrammes *(fig. 27* et *28)*.

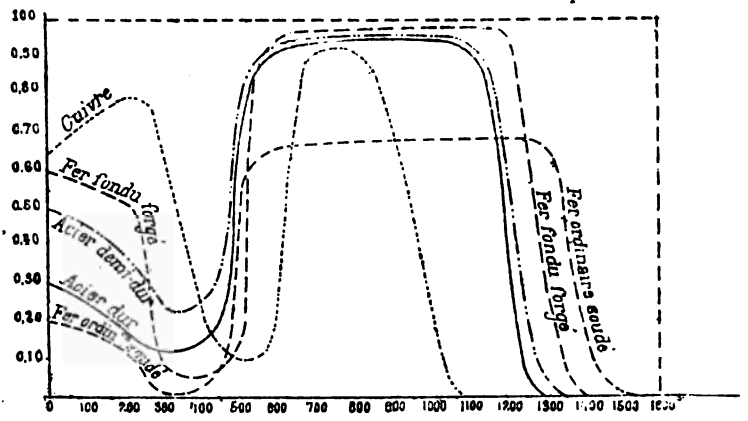
On constate que le fer soudé ordinaire à coefficient de ductilité à froid égal à 0,20 présente un minimum voisin de zéro vers 300°; qu'il prend une ductilité d'environ 0,64 à 600° et la conserve jusqu'à 1300°; puis, la ductilité s'affaiblit rapidement

pour tendre vers zéro à 1500°. Ce fer doit être travaillé entre 600 et 1300°.

La courbe relative au fer fondu forgé accuse un grand coefficient de ductilité à froid (0m,60) permettant de le courber sans crainte de criques. Mais, au delà de 300° et jusqu'à 550° environ, il serait imprudent de le forger, car le coefficient de ductilité reste très petit pendant cette période critique de température. La ductilité se relève rapidement vers 600° et prend une valeur étonnante atteignant presque l'unité à 1200°; ensuite la ductilité se perd rapidement; entre 1200° et 1400°, le métal devient fragile. Dans la période critique 200 à 500°, on constate sur les éprouvettes, près de la section de rupture, de nombreuses criques circulaires, parfois très prononcées, dénotant

Fig. 28

Coefficients de ductibilité aux diverses températures



bien le manque de ductilité et l'importance d'éviter toute manipulation à ce moment. Il est préférable de laisser refroidir complètement la pièce et de l'achever à froid, si on ne veut lui faire subir de réchauffage. Il convient donc de forger le fer fondu entre 700 et 1200° lorsque la pièce doit être fortement étirée ou déformée.

Les aciers ordinaires donnent lieu à des remarques analogues ; mais c'est surtout pour les aciers fondus à teneurs variables de matières diverses plus ou moins bien combinées qu'il est indispensable de connaître les périodes critiques de ductilité, qui sont excessivement capricieuses, soit quand le métal vient d'être coulé, soit même après qu'il a subi un étirage prononcé. La courbe du cuivre montre que la ductilité augmente jusqu'à 200° et même 300°, pour s'abaisser et présenter une période critique assez étendue entre 400 et 700° ; le métal reprend alors une grande ductilité avec maximum vers 800°, ductilité qui ne persiste pas, qui s'abaisse à 900° pour devenir nulle vers 1100°, point de fusion. Dans la période critique, de nombreuses criques s'étendent aux environs de la cassure. On voit que, pour le cuivre, la période de forgeage à haute température est très limitée, 700 à 900°, tandis qu'aux températures peu élevées 0 à 300°, le métal peut être manipulé avec plus de sécurité. Il conviendrait même de toujours travailler le cuivre à froid sur recuits répétés.

La ductilité étant très réduite, lorsque les métaux sont à des températures voisines de l'état pâteux, il faut éviter, à ce moment, de faire subir aux pièces des déformations prononcées. C'est à la faible ductilité centrale que les déchirures intérieures des gros lingots peuvent être attribuées lorsqu'ils subissent de fortes compressions partielles.

VI. — Engins de pressage.

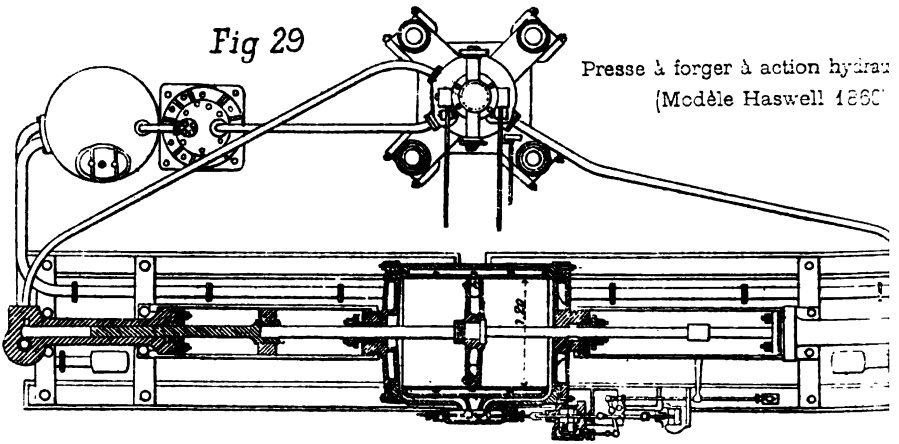
Les diverses opérations de forgeage exécutées par pressions lentes intermittentes ont donné lieu à la création de presses hydrauliques ou à vapeur de grande puissance, se prêtant au façonnage de pièces de toutes formes, à des presses mécaniques dont les outils sont actionnés par des organes rigides et que l'on emploie particulièrement pour les pièces de petites dimensions.

Nous signalerons dans ce chapitre les presses se rapportant aux applications générales.

Dès le commencement de ce siècle, la presse hydraulique était utilisée pour le travail du plomb. C'est en s'inspirant de cette application que plus tard, en 1847, Fox chercha à l'employer pour le forgeage proprement dit des autres métaux ; que, de même vers 1857, Benoît Duportail essayait d'en tirer parti pour des fabrications spéciales.

Haswell, vers 1860, réussit à effectuer les divers travaux des forges de Staats-Bahn à Vienne avec une presse *(fig. 29* et *30)*

Fig 29



Presse à forger à action hydrau
(Modèle Haswell 186

pouvant développer un effort maximum de 750 tonnes avec $0^{m},60$ de course.

Plusieurs presses de ce modèle furent successivement construites pour des pressions de 1.200, 3.000 tonnes et plus.

Rappelons que la presse Haswell était desservie par un puissant moteur à vapeur à cylindre horizontal actionnant deux pompes commandées simultanément par la tige du piston vapeur à double effet.

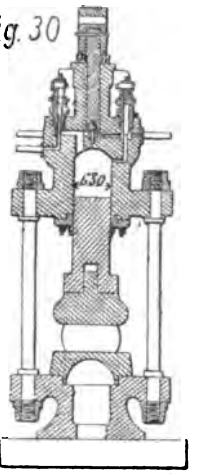
Ces pompes, aspirantes et foulantes à simple effet, refoulaient l'eau dans le cylindre de presse dont le plongeur était armé de l'outil forgeur.

Le relèvement se faisait par un piston hydraulique situé au-dessus du corps de presse principale.

Le socle de la presse était muni de l'enclume rechangeable au besoin.

La manœuvre de commande se faisait à la main par leviers, et on pouvait, à volonté, faire fonctionner l'outil par pressions intermittentes assez rapides ou par périodes de pression prolongée.

Fig. 30



A l'Exposition de Vienne 1873 (1) figurait une presse Haswell; M. Hippolyte Fontaine (Châl. 1848) lui attribuait de grands avantages pour le fini et la rapidité d'exécution des pièces matricées.

Presses Whitworth.

Whitworth a construit des presses perfectionnées qui en ont rendu l'emploi pratique pour comprimer les lingots, presser, façonner, forger toutes pièces.

Il a combiné la traverse mobile portant le cylindre presseur avec un appareil pour la lever, l'abaisser et la fixer rapidement en position, ce qui est un grand avantage; car, avec un piston de faible course, on peut opérer sur des pièces variant de hauteur.

Il a aussi adapté un mécanisme pour tourner la pièce à forger et assurer un forgeage uniforme et une disposition pour retirer le mandrin sur lequel sont forgées les pièces creuses, les cylindres, manchons, arbres.

La presse de Whitworth *(fig. 1, 2, 3, 4, 5, pl. 1)* (2) présente quatre piliers fixés à la base. Sur le sommet des piliers est placée une table de fonte T portant deux cylindres leveurs hydrauliques dont les béliers portent des traverses

(1) Les dessins de la presse Haswell figurent depuis 1873 au Portefeuille du Conservatoire des Arts et Métiers. Ils ont été exécutés par M. Georges Parent (Châl. 1866-1869), alors secrétaire du Conservatoire, qui les a relevés sur la presse des ateliers de Staats-Bahn.

(2) Brevet français, 4 mars 1875.

garnies chacune de deux barres de suspension. La tête mobile A se meut entre la base et le sommier T ou tête fixe de la presse. Elle monte ou descend par l'admission ou l'échappement de l'eau de dessous les béliers des cylindres leveurs C; l'eau provient d'un accumulateur.

Pour assujettir la tête mobile rapidement, quatre écrous circulaires E tournent lorsque la tête A monte ou descend et servent à tenir la tête en position lorsque la pression s'effectue.

Cette tête est en relation avec deux vis à pas rapide F passant à travers deux écrous G logés dans la table supérieure fixe de la presse.

Deux hérissons H sont clavetés sur les vis F et engrènent des roues correspondantes H' montées sur le pourtour des quatre écrous E des colonnes.

Lorsque la tête mobile se meut, les vis F sont repoussées à travers les écrous G de la tête fixe, ce qui fait tourner les vis F, attendu que les écrous sont alors fixes. La rotation se transmet aux quatre écrous E des piliers, écrous qui se déplacent verticalement à la même vitesse que celle de la tête mobile, mais avec un peu de jeu pour éviter le frottement.

Lorsque la tête est relevée à la hauteur voulue par les releveurs C, elle vient prendre appui sur les écrous E. Pour cela, les écrous G des vis à pas rapide F sont munis de dentures de pourtour engrenant avec deux crémaillères montées sur une même barre R qui se déplace horizontalement par un piston hydraulique, de sorte que les vis F, entraînées par leurs écrous G, actionnent de nouveau les roues H et H' et les écrous E pour les appliquer fortement contre la traverse A et l'assujettir. Une disposition auxiliaire ou frein d'arrêt maintient également les vis F à volonté.

La tête mobile porte un piston forgeur B qui applique la frappe sur la pièce. Un cadran indique le mouvement du piston à chaque descente. L'amplitude de la course peut être aussi

faible que l'on veut. On obtient ainsi un travail rapide soit pour l'ébauchage, soit pour le finissage des pièces cylindriques.

Pour faire tourner la pièce à chaque coup, on emploie un cylindre hydraulique S vertical *(fig. 6* et *7, pl. I)* combiné avec un levier à encliquetage dont le rochet est solidaire de la pièce ou du mandrin de la pièce.

Pour élargir un cercle comme une virole de chemise de cylindre à vapeur, on fait usage d'un mandrin cylindrique creux d'acier M *(fig. 6* et *7)* dont les bouts reposent sur des supports K. La virole est graduellement élargie sur le mandrin à chaque coup de bélier presseur qui porte la frappe D ou une étampe.

La virole conserve sa forme cylindrique, lorsque le bélier presseur est convenablement contrôlé par l'ouvrier d'après les indications du cadran, et lorsque le mouvement du bélier S est correctement ajusté de façon à tourner le mandrin d'une quantité égale entre chaque coup du bélier forgeur ou presseur, et à amener de nouvelles parties sous l'action de l'outil qui descend à chaque coup au même point.

Cette presse et son appareil auxiliaire permettent de soumettre les pièces à un traitement uniforme, ce qui est très important.

Pour un cylindre de grande longueur, on emploie le mandrin et l'appareil représentés par les *figures 8 à 12 (pl. I).*

H est un court noyau ou mandrin creux; pour faire avancer ce mandrin à mesure que l'ouvrage progresse, ou bien, pour le retirer complètement lorsqu'il faut réchauffer la virole, on emploie un cylindre hydraulique mobile L, ouvert à un bout et porté par la tige filetée V tenant au chariot N

Par l'action de l'engrenage d'angle P sur la vis V, le cylindre peut être élevé ou abaissé afin de s'adapter aux différents diamètres des mandrins employés.

Les presses Whitworth se construisent sur toutes dimensions avec des puissances pouvant développer 2.000, 5.000, 10.000,

14.000 tonnes (1), la pression hydraulique par centimètre carré s'élevant jusqu'à 500 kilogrammes. Ces presses sont employées pour le travail des plaques de blindage, des tubes à canons, des gros arbres.

Presse Davy de 4.000 tonnes.

La presse *(pl. II)* (2) construite par MM. Davy frères, de Sheffield, pour MM. Cammel et Cie, se distingue par l'adoption de deux plongeurs AA, de $0^m,915$ de diamètre et de $2^m,820$ de course, placés symétriquement par rapport à l'axe de l'outil, et s'appuyant sur le porte-outil B par leurs abouts de forme sphérique. Le porte-tas B est guidé par quatre colonnes *c* et par la traverse supérieure solidaire des cylindres hydrauliques, qui sont ainsi fixes et motivent la longue course des plongeurs.

L'emploi de deux plongeurs AA permet de forger un pièce beaucoup en dehors de la position moyenne, sans avoir à craindre la détérioration des organes.

Le porte-tas est relevé par des pistons hydrauliques E, de $0^m,230$ de diamètre et $2^m,135$ de course, dont la vitesse de relèvement est de $0^m,60$ par seconde, en mettant ces pistons en communication au moyen de grandes valves avec la basse pression d'eau.

Lorsqu'il s'agit, par exemple, de relever le tas de $0^m,100$ à $0^m,150$, au-dessus de la pièce à forger, on ouvre l'échappement des pistons forgeurs, les pistons releveurs recevant l'action de l'eau relèvent rapidement l'outil. Pour l'abaisser de même, vivement, l'échappement des pistons releveurs est ouvert et les pistons forgeurs sont en communication avec l'eau à basse pression; la descente se fait ainsi jusqu'à ce que l'outil appuie sur la pièce. Les pompes de haute pression agissant, les grandes

(1) La plus forte presse installée depuis peu à l'usine de Bethléem (Pensylvanie) du type Withworth, peut développer une pression de 14.000 tonnes, la charge par centimètre carré étant de 500^{kg}, le jeu des pompes exige une puissance de 16.000 chevaux-vapeur. La difficulté d'obtenir une bonne étanchéité des joints conduit à réduire la pression à une valeur voisine de 300^{kg} par centimètre carré.

(2) *Engineering*, 23 avril 1886.

valves des pistons forgeurs sont fermées automatiquement avec la conduite d'eau à basse pression et ouvertes avec celles à haute pression pour déterminer l'effort de travail de forgeage.

Dès que l'effet exigé a été effectué, l'outil se relève de nouveau pour un autre coup.

Deux leviers seulement sont nécessaires pour contrôler les trois opérations, un pour la presse elle-même, et l'autre pour la mise en activité des pompes.

La pression d'eau est obtenue par un jeu de trois pompes à simple effet, de $0^m,150$ de diamètre et $0^m,300$ de course, actionnées par un moteur à vapeur à deux cylindres de $0^m,865$ de diamètre. Pour la descente à blanc, les pompes et les pots de presse sont alimentés par un réservoir d'eau et d'air comprimé à la pression variable de 5 à 8^{kg}.

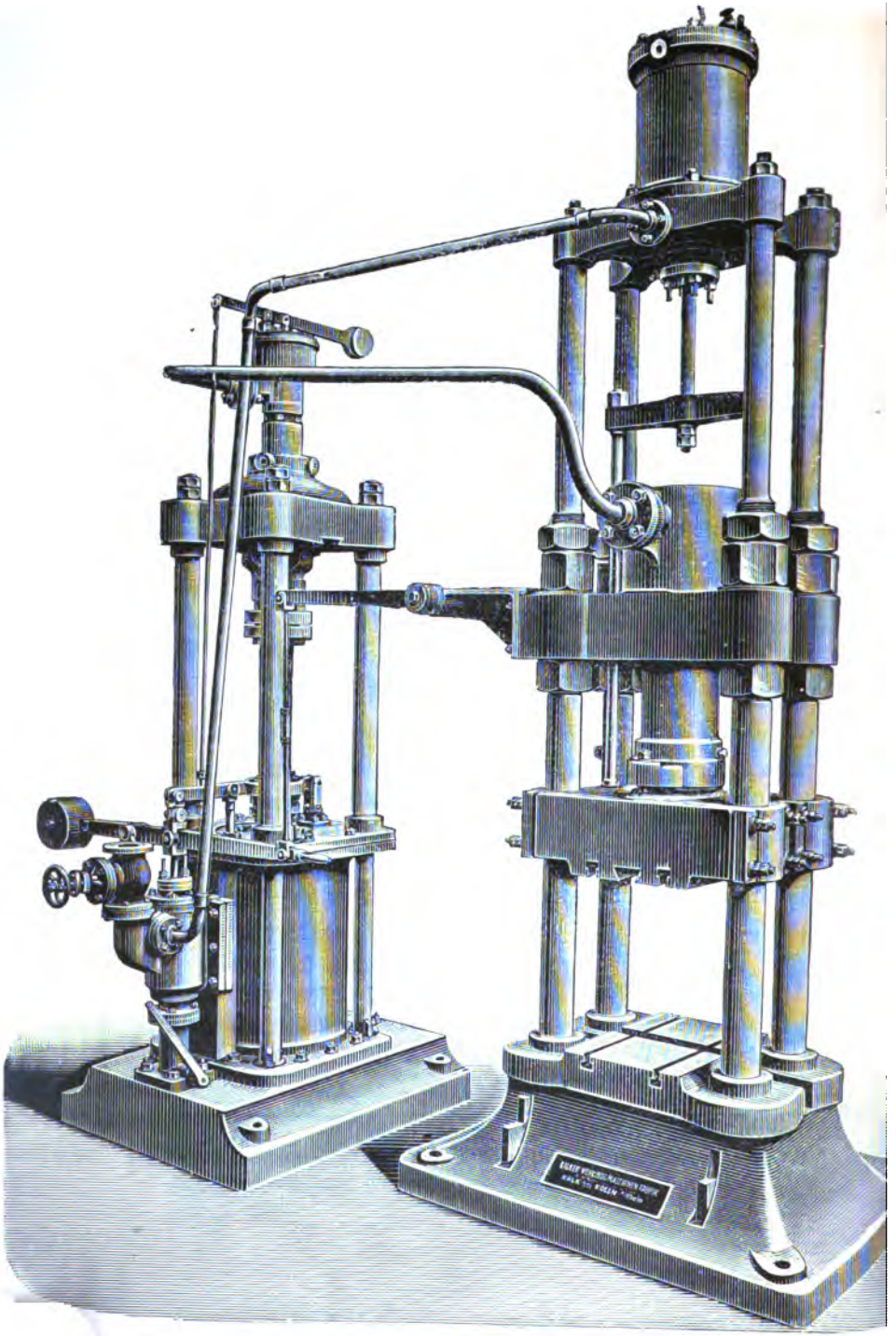
La pression hydraulique maximum est de 330^{kg} par centimètre carré. La capacité des pompes est telle qu'à chaque révolution, le porte-outil descend de $0^m,012$, ce qui détermine la course constante en travail. La surface des pistons releveurs et celle des pistons forgeurs sont dans le rapport de $\frac{1}{16}$. Les pompes peuvent fonctionner jusqu'à plus de 60 révolutions par minute, afin que la descente et le relèvement se fassent vivement.

La presse Davy, avec son moteur et ses diverses pompes, constitue un ensemble bien complexe, délicat et d'un entretien des organes distributeurs ne devant rien laisser à désirer pour assurer une bonne marche.

Presse Breuer, Schumacher et Cie.

Signalons encore la presse Breuer, Schumacher et Cie, assez récente et dont les dispositions sont relativement simples [vignettes *fig. 31* et figures *pl. III* (1)].

(1) *Génie Civil* du 28 octobre 1893. — MM. A. Delattre et Cie, à Ferrière-la Grande, construisent les divers modèles de la presse Breuer, qui a reçu de multiples applications (dont une de 6.000 tonnes aux usines Krupp à Essen).



La traverse porte-outil A est solidaire du piston de presse dont le cylindre est solidaire de la traverse supérieure fixe B. La mobilité à volonté de la traverse A pour régler la position de l'outil par rapport à la pièce est obtenue par deux pistons à vapeur C, à simple effet, reliés à la traverse A par leurs tiges. Ces pistons C se meuvent dans des cylindres dont chaque chambre inférieure est en communication avec le réservoir de vapeur pour produire l'élévation, ou avec l'atmosphère pour permettre la descente au plus près de la pièce.

Pendant ces opérations de mise en place primitive de l'outil, le cylindre de presse et le cylindre de compresseur D sont en communication avec un réservoir d'eau en charge destiné à fournir de l'eau pour faire le plein à la descente, ou recevant l'eau de trop-plein lorsque l'outil s'élève.

Dès que la position de l'outil est réglée, la soupape de communication avec le réservoir est fermée et la pression proprement dite peut se faire en introduisant de la vapeur sous le piston E dont la tige refoule l'eau du compresseur D par le tuyau F dans le pot de presse.

En réglant l'introduction de vapeur dans le cylindre G, on détermine à volonté l'action de l'outil, c'est-à-dire son abaissement depuis quelques millimètres jusqu'à une douzaine de centimètres, suivant les nécessités du travail. L'échappement de vapeur se fait en pénétrant d'abord au-dessus du piston de manière à établir un équilibre rapide et le piston E descend par son poids propre, tandis que, d'autre part, la vapeur admise d'une façon permanente ou intermittente sous les pistons releveurs produit l'ascension rapide de l'outil. La manœuvre des organes distributeurs auxquels nous ne pouvons nous arrêter, est simple; elle se fait au moyen d'un levier à main. La pression maximum qu'on ne peut dépasser est réglée par la pression de la vapeur admise dans le cylindre G.

Les presses de ce type sont très dociles, présentent une grande élasticité, grâce au ressort de vapeur motrice, ce qui

permet de faire fonctionner l'outil avec une vitesse de 0m,10 à 0m,20 sans craindre les coups de bélier qui détruisent les organes et les conduites. Les pertes de course étant réduites à des minima, le rendement mécanique est élevé. La presse Breuer de 700 tonnes peut donner pour l'étirage des lingots quinze à vingt coups par minute; pour le finissage, on peut donner trente coups de faible amplitude arrêtée facilement au point le plus bas, au moyen de blocs d'arrêt disposés sur l'enclume lorsque, par exemple, il s'agit de mettre une pièce à épaisseur constante.

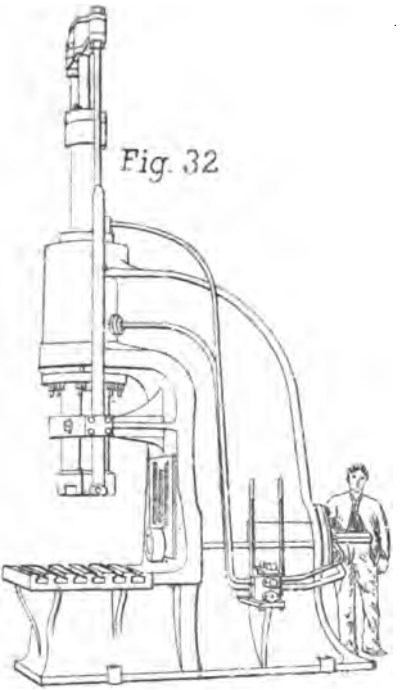


Fig. 32

L'utilisation de la presse à forger s'est particulièrement étendue en Angleterre et a donné lieu à la construction d'engins de force moyenne à disposition horizontale ou verticale du plongeur qui se prête, dans chaque cas, à l'exécution commode de pièces spéciales de dimensions exigeant des efforts variables de 30 à 100 tonnes. Les *figures 32* et *33* se rapportent à des presses de ce genre construites par MM. Henry Berry et Cie, de Leeds.

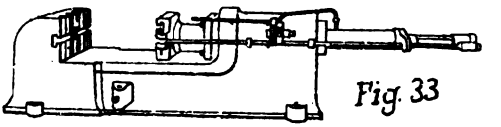


Fig. 33

Nous retrouverons plus loin de nombreux modèles de presses simples adoptées pour des procédés particuliers et actionnées soit par des organes rigides, soit par l'eau, la vapeur ou l'air comprimé.

En ce qui concerne les applications générales, l'emploi de la presse est préconisé pour le forgeage des gros lingots d'acier, parce qu'elle agit sans déterminer de vibrations.

La matière, en grande masse, conservant sa haute température assez longtemps, il est possible de la façonner sous des efforts plus ou moins considérables, n'exigeant pas des presses que l'on considère actuellement comme impossibles à construire.

La presse ayant un pouvoir limité, ne peut façonner que sous des efforts inférieurs à sa force. Il convient d'employer des presses permettant d'opérer sur des surfaces assez étendues, sinon le forgeage est long et dispendieux à cause des réchauffages.

Il faut reconnaître que la presse est un outil assez complexe de construction et d'entretien et qui nécessite des dimensions relativement considérables par rapport à l'effort dont on dispose.

Le grand avantage réside dans la continuité de cet effort qui se transmet bien à toute la masse et à son *rendement mécanique élevé* par rapport à celui du marteau ainsi que le feront ressortir les essais comparatifs signalés plus loin.

CHAPITRE II

I. — Procédés par pression vive, martelage, pilonnage.

La pression s'exerçant très vivement caractérise la percussion, le choc, le procédé de *martelage*, de *pilonnage*.

Dans le martelage ordinaire, direct, la pièce est placée sur une masse fixe, dite tas, ou *enclume*, ou *chabotte* (1). L'outil : le *marteau*, le *pilon*, est animé d'un mouvement oscillant ou rec-

(1) On disait autrefois : la jabotte.

tiligne alternatif à vitesse plus ou moins rapide, et dont la masse permet d'emmagasiner une énergie mécanique qui exerce une action vive sur la pièce.

Cette action, malgré sa vivacité, est tout à fait analogue à celle d'une pression graduelle lente, si ce n'est que la rapidité de l'effort met en jeu des forces d'inertie dont l'intensité n'est plus négligeable au point de vue du rendement et de la constitution des organes subissant le choc. La pression, partant de zéro au contact, atteint rapidement (en quelques dixièmes ou centièmes de seconde) sa valeur maximum. L'énergie emmagasinée dans la masse mobile se retrouve intégralement, après le choc, en déformation de la pièce, en chaleur, en puissance vive restituée à l'outil, en puissance vive perdue dans la masse d'appui, en déformation de cette masse et de l'outil, en vibrations sonores, élastiques.

Le phénomène est donc très complexe et difficile à analyser exactement au point de vue théorique.

La pression développée par le choc produit une réaction sensiblement égale sur l'enclume, de sorte que la pièce se trouve sollicitée par deux pressions d'intensité croissante qui se répartissent dans la masse plus ou moins uniformément.

La forme du marteau et celle de l'enclume ont une grande influence sur la répartition des pressions intérieures, de même que les dimensions et les propriétés mécaniques de la pièce soumise au choc.

Les pressions compriment le métal dans certaines parties, celles avoisinant l'outil; elles le dépriment, tendent à le crevasser dans d'autres, celles de pourtour ou d'intérieur, suivant que la pression agit transversalement ou longitudinalement, suivant qu'elle agit avec plus ou moins d'intensité sous des coups répétés.

Les différentes règles à suivre pour un martelage progressif, au point de vue de la meilleure fabrication, sont généralement observées par le forgeron qui, cependant, ne s'astreint pas à

suivre les lois du meilleur rendement de l'énergie dépensée.

Le praticien s'inquiète, tout particulièrement, d'obtenir des pièces bien conditionnées. Si, pour arriver à ce but, il est nécessaire de sacrifier le rendement, il n'hésite pas, d'autant plus que, dans bien des cas, l'opération économique altérerait le métal, donnerait lieu à de nombreuses pièces de rebut qui feraient perdre tout l'avantage attendu. Dans le martelage proprement dit, une règle suivie d'une manière générale consiste à n'opérer les déformations que graduellement, par coups de marteau répétés, alors qu'au point de vue du rendement mécanique, et dans certains cas, la théorie et les essais indiquent qu'il faudrait opérer en un seul coup si possible.

M. H. Tresca a déterminé la quantité de chaleur développée par la percussion d'un marteau en opérant sur des éprouvettes enduites de cire (1).

Il a déduit les conclusions suivantes :

1° Le développement de chaleur résultant du forgeage dépend de la forme des pannes et de l'intensité des coups ;

2° Pour les pannes à arêtes vives, ce développement est particulièrement mis en évidence au voisinage des arêtes et au centre de la barre forgée ;

3° Ces points correspondent au plus grand glissement de la matière, et ce glissement est bien le phénomène mécanique qui donne lieu au phénomène calorifique ;

4° Pour des actions suffisamment énergiques et pour des barres de dimensions suffisantes, on retrouve ainsi en chaleur les 8/10 environ du travail dépensé ainsi dans la percussion ;

5° Les figures formées par la cire fondue, pour des chocs de faible intensité, fournissent une sorte de diagramme du mode de répartition de la chaleur et du mode de déformation à l'intérieur de la barre ;

6° Dans ces conditions de faible choc, le calcul du coefficient

(1) *Séances de l'Académie des Sciences*, 25 juin et 23 juillet 1888.

de rendement ne conduit plus qu'à des résultats tout à fait insuffisants.

Les essais faits avec des pannes planes et des pannes arrondies conduisent à des conclusions analogues, mais le mode de répartition de la chaleur est différent.

Ces essais font surtout ressortir l'importance de la transformation de la puissance vive en chaleur. On se rend compte aisément de ce qu'une barre d'acier vivement martelée à froid ne tarde pas à être portée au rouge. Dans le martelage à chaud, les calories produites par le choc ont pour effet de maintenir plus longtemps le métal à la température convenable, avantage qui ne présente pas l'action plus lente de la presse.

Pour analyser sommairement les effets du martelage, considérons en premier lieu une masse à haute température, dont les molécules ont peu de cohésion, telle qu'une petite loupe de fer sortant d'un four de puddlage.

Sur une telle masse, un maillet de bois (1) produira un meilleur effet pratique qu'un marteau d'acier; le choc ne doit pas être intense; les molécules se resserrent et les scories sont expulsées suffisamment par l'action du maillet dont la puissance vive est utilisée sans perte sensible en travail de déformation, de resserrement de la masse, les projections de métal étant peu nombreuses. Au contraire, un gros marteau produisant toute son action donnerait lieu, dans cet état de la masse, à de nombreuses pertes de métal; le travail serait défectueux, le rendement théorique du choc serait cependant très élevé.

Mais, dès que la loupe s'est refroidie (1400°), le maillet devient insuffisant, bien que ses coups fassent toujours leur effet théorique qui se localise. Il faut avoir recours à un choc plus fort; le marteau d'acier devient à son tour l'outil convenable, permettant de chasser les impuretés sans détériorer la masse, en opérant à coups répétés d'intensité modérée en rapport avec

(1) C'est avec le maillet que les anciens forgerons agglutinaient d'abord leurs petites loupes de fer.

le volume de la loupe qui est retournée, de manière à lui donner une forme prismatique. Le rendement est toujours élevé, la malléabilité étant grande.

La température s'abaissant à 1000°, l'énergie des coups doit augmenter; la vitesse de choc est plus grande; le métal possédant une certaine élasticité réagit, transmet à l'enclume et à ses fondations une portion de la puissance vive qui se transforme aussi en chaleur; le rendement s'abaisse. A 800°, ces effets s'accentuent; à 500° les déformations deviennent plus faibles encore, les pertes d'énergie augmentent, surtout sous forme de chaleur qui n'est perdue qu'en partie, une certaine quantité de calories réchauffant la pièce pour le bien de l'opération.

Aux températures plus basses encore, le rendement se réduit de plus en plus et le forgeron a d'ailleurs soin de suspendre le martelage, qui détériorerait ses outils et la pièce. Il ne renouvelle l'opération qu'après réchauffage du métal à une température élevée, qui permet seule d'obtenir un effet utile.

Dans cet exemple, nous trouvons les différentes périodes générales d'un martelage rationnel.

Suivant le travail, il faut employer l'outil approprié. Le forgeron ne se trompe pas en opérant d'abord, par coups modérés rapides ne déformant pas trop la masse, la resserrant sur tout son pourtour, puis en donnant des coups de plus en plus intenses et toujours rapides, suivant que le métal est plus homogène et s'est plus refroidi.

Il faut donc proportionner les coups aux effets à produire et adopter, ni un marteau de poids exagéré, ni un marteau trop léger.

Il faut surtout opérer rapidement, par coups répétés, lorsque le métal est à haute température et possède le maximum de malléabilité.

On conçoit *a priori* que, plus la pièce martelée sera de nature molle et suffisamment épaisse, plus l'effet utile, le rendement du choc sera élevé. Au contraire, une pièce à métal élastique,

résistant, ne se brisant pas sous le choc, donnera une déformation permanente, pour ainsi dire nulle, et une grande partie de l'énergie sera dépensée en vibrations, en calorique ; une autre partie fera relever le marteau.

Loi de similitude du martelage.

En principe, si les éléments de l'énergie nécessaire pour marteler une pièce sont déterminés, on en déduit que pour marteler une autre pièce de dimensions m fois plus grandes, il faut un travail m^3 fois plus grand. Par exemple, si deux pièces prismatiques ont respectivement pour dimensions homologues

$$\frac{a}{a'} = \frac{b}{b'} = \frac{c}{c'} = \frac{1}{m^3},$$

on aura entre les volumes V et V', et les poids P et P'

$$\frac{V}{V'} = \frac{P}{P'} = \frac{abc}{a'b'c'} = \frac{1}{m^3}.$$

Si T et T' sont les travaux nécessaires pour modifier les formes dans les mêmes proportions, on peut poser

$$\frac{T}{T'} = \frac{V}{V'} = \frac{P}{P'} = \frac{1}{m^3},$$

c'est-à-dire que : les travaux mécaniques nécessaires pour déformer de la même manière et *avec la même vitesse* deux corps de même nature et de formes semblables, sont proportionnels à leurs volumes ou à leurs poids (1).

Cette loi de similitude permet, à l'aide d'expériences en petit, de comparer, d'évaluer certains travaux, d'analyser les phénomènes qui se produisent, ce qui serait souvent difficile dans beaucoup de cas pratiques.

Elle permet de calculer les éléments d'engins de même nature. Par exemple, si une pièce pesant 10^{kg} est martelée par un coup de $200^{kgm} = \frac{MV^2}{2}$, une pièce de 100^{kg} exigerait un coup de

(1) Cette loi a été démontrée par H. Tresca : *Annales du Conservatoire des Arts et Métiers*, VI, 1865.

$2000^{kgm} = \frac{M'V^2}{2}$, pour obtenir un résultat semblable.

Il faudrait établir le rapport $\frac{200}{2000} = \frac{M}{M'}$, soit $M' = 10M$.

Ou encore, une éprouvette de 20^{mm} de hauteur $= h$ sur 20^{mm} de diamètre $= d$ est réduite de $2^{mm} = 1/10\ h$ par un marteau de 10^{kg} tombant de 4^m; soit une énergie $T = 10 \times 4 = 40^{kgm}$. Un cylindre de 1.000^{mm} de diamètre $= d'$ et de 1.000^{mm} de hauteur $= h'$, réduit de $100^{mm} = 1/10\ h'$ exigera une énergie T' déduite de la relation $\frac{T'}{T} = \frac{V'}{V} = \frac{\pi d'^2 h'}{\pi d^2 h} = \frac{d'^2 h}{d^2 h}$, soit

$$T' = \frac{T \times d'^2 h}{d^2 h} = \frac{10 \times 4 \times 1.000 \times 1.000 \times 100}{20 \times 20 \times 2} = 5.000.000^{kgm}.$$

La réduction étant de 100^{mm}, l'effort théorique moyen serait $\frac{T'}{0{,}100} = 50.000.000^{kg}$; la hauteur de chute du marteau étant aussi de 4^m, il faudrait un marteau de poids

$$P' = \frac{5.000.000}{4} = 1.250.000^{kg},$$

soit dix fois le poids du pilon de Bethléem.

Pour les forts engins, on serait amené à donner des dimensions et des poids que la pratique trouverait exagérés. On préfère augmenter, dans une certaine mesure, la vitesse, c'est-à-dire la course du marteau, mais dans une proportion moindre que celle du poids.

Ainsi on adopte pour les marteaux-pilons à simple effet :

Poids du marteau :	1.000	5.000	15.000	50.000	100.000	125.000^{kg},
Course en mètres :	1	2	3	4	5	6^m

soit une levée ordinairement comprise entre 1 et $1{,}2\sqrt[3]{P}$.

Nous verrons, plus loin, que cette règle, qui modère la vitesse, est la plus avantageuse à divers points de vue.

Influence de la masse et de la vitesse du marteau.

La masse et la vitesse du marteau ont aussi une action prépondérante sur le travail. La masse doit être en rapport avec

les dimensions de la pièce à marteler. Un petit marteau lancé à faible vitesse sur une grosse pièce malléable, molle, peu résistante, y produit une légère empreinte; lancé à grande vitesse, le marteau y pénètre à la manière d'un projectile, la déformation est toute locale. Un gros marteau agissant par son poids sur une petite pièce, l'écrase à la manière d'une presse; si la vitesse est grande il y a excès de puissance nuisible au travail.

Le praticien préfère opérer avec un marteau de puissance modérée permettant de marteler par coups répétés, en limitant les déformations, quoique, au point de vue du rendement, le martelage répété soit moins économique.

La vitesse de choc influe tout particulièrement sur le rendement, en ce sens que les effets d'inertie sont plus intenses, qu'il y a plus grand dégagement de chaleur, la pression maximum du choc est plus élevée, les outils fatiguent plus; le rendement est moindre ainsi que le feront ressortir les divers essais que nous signalerons ultérieurement.

La pratique préfère, avec raison, les marteaux lourds à faible vitesse aux marteaux légers à grande vitesse, si ce n'est, toutefois, pour les façons rapides, pour les pièces dont le coût de la puissance mécanique compte peu, et pour lesquelles aussi il y a lieu de considérer la rapidité de refroidissement qui est un facteur très important au point de vue du rendement final.

Influence de la masse d'appui.

Enfin, un point essentiel est la masse sur laquelle la pièce est placée.

Si cette masse était faible, libre ou très élastique, le choc la déplacerait et l'énergie serait en grande partie transformée en oscillations élastiques. On pourrait appliquer la relation générale connue

$$\frac{MV^2}{2} \pm \frac{M'V'^2}{2} = \frac{(M+M')V_1^2}{2} + \text{(travaux de déformations et autres)}.$$

Mais, comme la masse M′ d'appui de la pièce est supposée au repos, cette relation devient :

$$\frac{MV^2}{2} = \frac{(M + M')V_1^2}{2}.$$

Pour annuler la force vive des masses M et M′ après le choc, il faut que la vitesse V_1 soit nulle, ce que l'on obtient en faisant reposer la masse M′ sur le sol, ce qui a pour effet de lui assurer une valeur excessivement grande par rapport à la masse M du marteau.

Il s'ensuit que toute l'énergie $\frac{MV^2}{2}$ se transforme en travail de déformation de la pièce martelée, en chaleur, en vibrations qui se développent dans les masses M et M′, en déformations permanentes ou élastiques de ces masses et du sol.

La masse M′ se compose de matériaux non homogènes; les réactions de cette masse sont, par suite, très difficiles à estimer et la pratique seule peut indiquer les meilleures conditions d'établissement des fondations.

Il convient d'abord d'assurer la résistance de la partie sur laquelle est appliquée la pièce.

Le degré d'élasticité des divers éléments a toujours une grande influence sur le rendement, sur la conservation, la durée des pièces. Des chocs durs et puissants ne tardent pas à briser les parties les plus résistantes; c'est pourquoi on adopte des fondations comprenant des parties en bois, matière qui résiste bien, grâce à son élasticité. La masse principale (chabotte) est en fonte, son poids varie de cinq à quinze fois celui du marteau pour les gros marteaux, et de dix à vingt fois pour les petits (1).

(1) Sellers donne, avec raison, un rapport plus grand aux marteaux travaillant l'acier qu'à ceux travaillant le fer. Ainsi il donne aux enclumes de ses pilons à double effet un poids cinq fois plus fort que celui du marteau, pour le travail du fer. Il est huit fois plus fort pour le travail de l'acier. On ne tient guère compte des variations de vitesse, attendu que les forces d'inertie du marteau et de la chabotte varient, de même, avec la vitesse.

Éléments de l'Énergie mécanique du marteau.

L'utilisation de l'énergie mécanique par le marteau n'est pas assez analysée par la plupart de ceux qui emploient cet outil si simple et de si grande force relative, même sous faible masse.

Combien se doutent seulement qu'avec un petit marteau du poids de 1^{kg}, le moindre coup développe une pression relativement considérable pouvant s'élever de 100 à 1000, 5000^{kg} et plus, à volonté, par la manœuvre à la main, sans grande fatigue, à coups répétés. L'ouvrier, en général, n'a pas la moindre notion de cette action mécanique, il ne peut apprécier l'effort qu'il exerce en martelant une pièce (1).

Cette action est également peu appréciée par ceux qui savent cependant appliquer la relation de la force vive; et cela, parce qu'aucun exemple comparatif attire leur attention.

Le travail mécanique développé par la masse d'un marteau en mouvement peut toujours être supposé dépensé par un effort constant F parcourant un chemin E, et cela quelle que soit la durée de l'action mécanique, durée qu'il n'y a pas lieu de considérer ici.

Si nous admettons, par exemple, qu'un marteau de 1^{kg} possédant une vitesse de 4^{m} déplace une pièce frottante, de masse négligeable, d'une quantité égale à $0^{m}001 = E$, l'effort F produit sur la pièce se déduit aisément de la relation du travail :

$$EF = \frac{MV^2}{2} = \frac{PV^2}{2g} = \frac{1 \times 4^2}{2 \times 9{,}8} = 0^{kgm}81, \text{ soit } F = \frac{PV^2}{2gE} = \frac{0{,}81}{0{,}001} = 810^{kg},$$

(1) Combien de fois nous avons demandé à des ajusteurs, des forgerons, à tous ceux qui utilisent le marteau : à quel effort ils estimaient leurs différents coups de marteau. Tous répondaient d'une façon analogue, accusant une valeur insignifiante; quelques kilogrammes, 4 à 10; exceptionnellement 10 à 20^{kg}. Et, lorsque nous leur disions que c'étaient des centaines, des milliers de kilogrammes qu'ils appliquaient sur la pièce, ils se refusaient à nous croire. Combien d'ingénieurs et d'élèves de nos écoles techniques sont dans le même cas?

soit 800^{kg}. Or, il faut un coup de marteau *très faible* pour lui imprimer une vitesse de 4^{m} et produire une pression de 800^{kg} sur la pièce. Nous négligeons tous les phénomènes élastiques, qui auraient pour effet, dans les cas considérés, de réduire le chemin parcouru produisant une action utile, d'affecter le rendement, sinon il faudrait supposer des vitesses plus grandes à l'outil.

Le même coup de marteau, à vitesse de 4^{m}, ne déplaçant la pièce frottante que de 0^{m},0001, il se produit un effort de 8000^{kg}.

Un coup assez énergique correspondant à une vitesse de 10^{m} et déplaçant la pièce de 0^{m}001 donnera un effort

$$F = \frac{1^{kg} \times 100}{2 \times 9{,}8 \times 0{,}001} = 5.000^{kg}.$$

C'est la valeur à attribuer au coup de marteau pour *buriner*, pour forger au petit marteau à main.

Ce même coup déplaçant la pièce de 0^{m},0001 exercera une pression de 50.000^{kg}. Ce nombre est évidemment très grand, paraît très exagéré, n'est pas pratique; mais, on se fait une notion de sa valeur lorsqu'on observe le travail, et les pressions nécessaires pour déformer les métaux résistants. Supposons que le marteau exerce cet effort sur un cube d'acier de 0^{m},030 de côté, soit sur une surface de $30 \times 30 = 900^{mm2}$; la pression par millimètre carré sera $\frac{50.000}{900} = 55^{kg}$, soit à peu près la valeur à laquelle ce métal peut commencer à se refouler d'une façon appréciable et sensible avec les instruments de mesure ordinaires.

Avec un marteau de 10^{kg}, tombant de 1^{m}, soit une énergie de 10^{kgm}, le déplacement de choc étant 0,001, l'effort atteint

$$F = \frac{10 \times 1}{0{,}001} = 10.000^{kg}.$$

La vitesse du marteau est $V = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 1} = 4^{m}40$.

Le même marteau tombant de 8^m peut donner lieu sur du plomb à un déplacement de 0,001 et un effort de 80.000^{kg}, la vitesse étant alors $V = \sqrt{2 \times 9,8 \times 8} = 12^m,50$. Cette vitesse correspond à celle d'un coup de marteau à devant donné très rapidement par un frappeur.

Pour développer un tel effort avec une presse, cet engin doit présenter un mécanisme dont la complexité ne saurait être comparée à la simplicité du marteau à manche. En supposant une table de marteau de surface égale à $60 \times 60 = 3.600^{mm2}$, et, un coup produisant une empreinte de déformation sur du fer à froid exigeant une pression de 40^{kg} par millimètre carré, l'effort total s'élèverait à 144.000^{kg}. Si on considère un marteau de 125 tonnes tombant d'une hauteur de 6^m, on disposerait ainsi d'un coup dont l'énergie serait 750.000^{kgm}. En admettant que le chemin parcouru par l'outil en travail soit de 20^{mm}, l'effort ou pression au contact de la table du marteau serait

$$F = \frac{PH}{E} = \frac{750.000}{0,020} = 37.500.000^{kg}.$$

La table du marteau ayant $3^m,500$ de longueur sur $0^m,50$ de largeur, sa surface est de $1.750.000^{mm2}$. La pression par millimètre carré serait donc de 21^{kg}, soit celle qu'il est nécessaire de produire sur de l'acier au rouge pour le déformer.

Une presse de 14.000 tonnes ne saurait opérer, dans des conditions analogues, que sur une surface deux fois et demie moindre. En supposant un déplacement réduit à 0,01 la pression F serait doublée et portée à $75.000.000^{kg}$, soit un effort supérieur à cinq fois celui de la presse ; la pression par millimètre carré serait d'environ 40^{kg}, correspondant à la déformation prononcée du cuivre rouge, ou à la déformation de début du fer, à froid.

Entre ces limites du petit marteau de 1^{kg} et du colossal pilon de 125.000^{kg}, les forges possèdent un nombre incalculable de marteaux de tous poids, représentant une puissance d'action prodigieuse, s'appliquant à la plupart des procédés de mise en

œuvre de métaux avec une aisance de direction qu'aucun outil ne présente au même degré.

Ainsi, le marteau à main se prête d'une façon simple à toute espèce de travail : étirage, battage, emboutissage, rabattage de bords, formation d'objets sur mandrins, tas, bigornes; au rivetage, soudage, pliage, etc.

De même, le marteau mécanique s'applique à tous travaux analogues avec une rapidité variable à volonté dans des limites relativement étendues.

Le marteau reste donc l'outil de forgeage le plus simple, le plus universel.

Il est également le plus puissant. En effet, le pilon seul permet de traiter les grosses masses de fer ou d'acier à de basses températures; aucun autre outil ne peut développer des efforts aussi grands que ceux d'un pilon de 125 tonnes.

Rendement du marteau.

Le rendement du choc produit par le marteau, c'est-à-dire le rapport du travail utile au travail dépensé est très variable. Il dépend de la nature du corps choqué, de la vitesse du choc, de la puissance des coups. Le rendement peut avoir une valeur nulle si le métal est très élastique, si le marteau bat, par exemple, sur un ressort; le rendement peut être très élevé, si la vitesse et la résistance de la matière sont faibles. On peut, par des essais, rechercher le coefficient de rendement, en considérant les divers métaux usuels, en faisant varier les dimensions des éprouvettes soumises au choc simple ou à des chocs répétés ainsi que la pratique le fait ordinairement.

La vitesse étant aussi différente, et les essais se faisant dans des conditions analogues à celles généralement suivies, il est possible de déduire les lois de rendement; de comparer entre eux les résultats et de juger si le praticien adopte les meilleures conditions de travail.

II. — Essais de chocs.

Les essais sur un métal chauffé qui ne peut conserver une température constante, étant très difficiles à obtenir dans des conditions bien déterminées, on est conduit à opérer sur les métaux à froid malléables à la température ordinaire, soit sur le plomb qui, ne possédant pour ainsi dire pas d'élasticité, donne des déformations permanentes telles que le choc les a produites.

Mais il convient aussi de considérer le cas de métaux possédant une certaine élasticité, soit à froid, soit à chaud, et l'on est amené à opérer sur du cuivre, du fer et de l'acier, de façon à pouvoir comparer les résultats et à en tirer d'utiles observations. Il faut, autant que possible, pour faciliter les mesures, pour assurer la réussite des essais au plus près, choisir des éprouvettes simples, cylindriques, cubiques, prismatiques, des éléments de tuyaux qui donnent des déformations prononcées. On peut, mais avec moins de sûreté, opérer sur des poinçons qui pénètrent dans une masse assez grosse par rapport au poinçon, ou mieux, avec une tige cylindrique s'enfonçant à frottement plus ou moins énergique dans un bloc percé d'épaisseur variable à volonté, de manière à permettre d'augmenter la valeur du frottement.

On mesure l'effort de frottement longitudinal, la tige étant enfoncée d'outre en outre du trou. Puis on enfonce la tige par des coups de marteau de puissance variable dont on apprécie la valeur et l'effet par la mesure des déplacements correspondants.

L'estimation exacte du frottement se fait aisément à l'aide d'une machine à essayer. Quant à la mesure précise d'un petit enfoncement, elle peut se faire par le palmer au centième de millimètre, ou par la mesure de déplacements totaux qui corres-

pondent à un nombre de coups de puissance pratiquement égale.

La plupart de nos essais au choc ont été rapportés en prenant comme commune mesure d'essais, sur des éprouvettes identiques, l'énergie dépensée par la presse d'une machine à essayer (1).

ESSAIS AVEC TIGE ENFONCÉE DANS UNE BAGUE

Marteau à main.

Ces essais ont particulièrement eu en vue la détermination de la vitesse minimum que peut posséder un marteau à main du poids de 1^{kg} et le marteau à devant de 5^{kg}, au moment où se produit le choc.

La tige de 50^{mm}. de diamètre était successivement engagée *(fig. 34)* dans des bagues de diamètre d'alésage légèrement plus petit et de hauteur de 50^{mm}. La tige était déplacée à plusieurs reprises longitudinalement pour mesurer l'effort moyen à la machine à essayer.

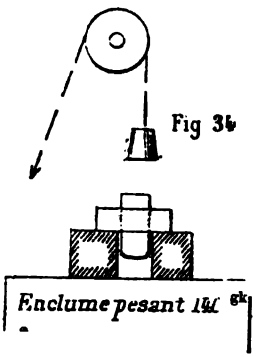


Fig 34

De même, pour mesurer le déplacement dû au choc du marteau, on a donné plusieurs coups d'intensité analogue et on a mesuré la moyenne des déplacements.

En ne tenant pas compte de la perte d'effet utile et en appliquant les relations du travail de la force vive, on a obtenu des valeurs minima pour la vitesse et les accélérations. Le tableau n° 9 indique les éléments des essais.

(1) Machine de M. Delaloe (Ang. 1855), qui permet d'opérer avec une précision pour ainsi dire mathématique.

Pour le calcul de l'accélération, et de la durée de la chute il a été admis que la trajectoire était parcourue d'un mouvement uniformément accéléré (1).

Ces essais montrent bien le grand effort que l'on peut exercer avec un simple marteau de 1^{kg}.

On voit que la résistance de 13.600^{kg} est déplacée de 0,0004 par coup énergique de développement égal à 1,70 avec vitesse de choc de $10^{m},3$.

La limite appréciable au palmer de la déformation d'une éprouvette sous le choc du marteau de 1^{kg}, correspond à un effort de 15 à 20.000^{kg} donnant une réduction d'épaisseur de $0^{m},0001$.

La vitesse minimum calculée du marteau à main pour les divers coups indiqués dans le tableau varie de $4^{m},84$ à $15^{m},20$; on peut ainsi juger de la rapidité relative en comparant ces vitesses à celles du poids tombant naturellement de hauteurs variables.

On peut facilement estimer l'énergie dépensée par le maniement du marteau pendant une durée déterminée, les coups étant donnés régulièrement.

En donnant un coup par seconde, le travail peut varier de 1^{kgm} à 12^{kgm}.

En observant les oscillations du marteau avec un métronome, on peut admettre qu'avec le marteau à main, la chute a une durée moitié de celle de la levée.

---

(1) Les formules appliquées sont :

$$\frac{MV^2}{2} = \frac{PV^2}{2g} = EF \qquad V = \sqrt{\frac{2gEF}{P}} = 4.4\sqrt{\frac{EF}{P}}.$$

La durée de la chute du marteau, E' étant le chemin parcouru, est donnée par $t = \frac{2E'}{V}$.

L'accélération est $a = \frac{V}{t}$.

Essais de chocs sur tige enfoncée dans une bague.

Tableau n° 9.

Effort d'allongement de la tige	PÉNÉTRATION sous le choc	TRAVAIL de pénétration T_v	POIDS du marteau	CHEMIN ou chute	VITESSE déduite ou exacte	DURÉE de la chute	ACCÉLÉRATION	TRAVAIL du marteau T_{mv}	RAPPORT $\frac{T_v}{T_{mv}}$	OBSERVATIONS
	Mètres	Kgm	KG			"				
300	0,004	1,2	1	1	4,84	0,41	12			Coup très modéré; un coup de maillet de menuisier produisait un effet analogue.
2.400	0,002	4,8	1	1,50	9,60	0,31	35			Coup assez énergique.
3.400	0,005	12	1	1,70	15,20	0,22	69			Coup très rapide.
6.500	0,001	6,5	1	1,60	11,2	0,285	38			Coup assez énergique.
12.000	0,00065	7,9	1	1,70	12,4	0,275	45			Coup très énergique.
13.600	0,0004	5,44	1	1,70	10,3	0,33	31			Coup très énergique.
2.400	0,009	21,6	5	2,30	9,28	0,5	18,56			Marteau à bras dit à devant, donnant des coups à peu près de même énergie à raison de 40 par minute.
6.500	0,003	19,4	5	2,30	8,7	0,53	16,4			
12.000	0,0014	16,8	5	2,30	8	0,575	13,9			
13.600	0,0012	16,2	5	2,30	7,9	0,582	13,8			
6.300	0,0014	8,7	11	1	4,40	0,45	9,8	11	0,79	Chute verticale du poids de 11kg.
6.300	0,0026	16,3	11	2	6,20	0,64	9,8	22	0,74	
6.300	0,005	31	11	4	8,80	0,9	9,8	44	0,70	
8.500	0,0009	7,6	11	1	4,40	0,45	9,8	11	0,69	
8.500	0,0018	15,2	11	2	6,20	0,64	9,8	22	0,69	
8.500	0,0026	22	11	3	7,60	0,79	9,8	33	0,66	
13.600	0,0024	32,6	11	4	8,80	0,9	9,8	44	0,74	
13.600	0,0028	38	11	5	9,80	1,1	9,8	55	0,69	
13.600	0,003	41	11	6	10,4	1,15	9,8	66	0,62	

Marteau à devant.

Les essais au marteau à devant de 5kg ont donné des résultats assez concordants, montrant que les vitesses au moment du choc (vitesses calculées qui sont des minima relatifs) peuvent varier pour ce marteau aux environs de 8 à 10m, les accélérations étant très inférieures à celles du petit marteau à main.

Avec un marteau à devant de 5^{kg}, on peut moyennement battre 40 coups par minute, de sorte qu'en admettant un travail de 20^{kgm} par coup, on dispose d'un travail de

$$\frac{20 \times 40}{60} = 13^{kgm}$$

par seconde, pouvant déterminer à volonté des efforts variant de 10.000 à 30.000^{kg} et donnant encore, à ce dernier chiffre, une déformation appréciable; avec un effort de choc de 50.000^{kg}, la réduction d'épaisseur d'une éprouvette ou l'enfoncement serait d'environ $0^{m},0001$.

En tenant compte de la perte de force vive due à la déformation et à l'inertie de l'éprouvette enfoncée et en supposant que le travail effectif du marteau s'élève à 1,3 (EF), la vitesse indiquée doit être multipliée par $\sqrt{1,3} = 1,15$; la durée doit être divisée par ce coefficient, et l'accélération doit être multipliée par 1,3.

Cette valeur 1,3 (EF) est justifiée par les essais suivants :

Essais avec mouton tombant de hauteurs variables.

Afin d'apprécier le rendement du choc d'un marteau agissant sur une tige enfoncée à frottement, nous avons complété les essais précédents par d'autres relatifs à un mouton tombant de hauteurs variables connues, de sorte que, d'une part, on connaît exactement le travail dépensé $T_m = PH$, et, d'autre part, on constate le travail utile $T_u = EF$, ce qui permet d'établir le rapport $\frac{T_u}{T_m}$.

Les éléments de ces essais sont indiqués dans le tableau précité; ils montrent que le coefficient de rendement peut atteindre 0,80; qu'il est plus grand à faible vitesse qu'à grande vitesse, c'est-à-dire avec de faibles hauteurs de chute qu'avec de grandes hauteurs.

Le rendement diminue également avec l'intensité des efforts, le marteau étant de poids constant.

Dans ces essais, il est assez difficile de conserver aux tiges enfoncées leur régularité parfaite sous l'action de chocs répétés nécessaires pour estimer les déplacements par une moyenne. De plus, les bagues se brisent; l'ajustement des pièces est difficile; c'est pourquoi nous avons préféré opérer sur des éprouvettes d'écrasement pour les essais suivants :

ESSAIS COMPARATIFS DE CHOC ET DE COMPRESSION

Nous pensions simplement rappeler, avec les observations qui s'en déduisaient, les essais signalés par MM. Casalonga et Chômienne, dans leurs remarquables études sur la presse et le pilon (*Bulletin technologique* de janvier 1888). Mais, en comparant ces essais, nous avons remarqué certaines anomalies qui nous ont conduit à en faire plusieurs séries d'autres.

Cependant, comme il ne nous était pas possible d'opérer avec un marteau de 3.500^{kg}, nous avons rappelé lesdits essais en les interprétant de manière à faire ressortir des rapports d'énergie de la presse et du marteau qui, toutefois, ne sauraient être que relatifs.

Les éléments sont indiqués dans le *tableau n° 10*. Des essais de MM. Casalonga, il ressort une loi à progression rapide du rapport $\frac{T_p}{T_m} = \frac{\text{Energie de la presse}}{\text{Energie du marteau}}$, tandis que dans les essais de M. Chômienne, ce rapport est sensiblement constant.

Essais de MM. Casalonga.

Conservant les nombres se rapportant aux essais de choc de MM. Casalonga, nous avons fait à la machine à essayer trois essais de pénétration d'un poinçon de 20^{mm} de diamètre dans une barre de plomb de 30/30, et nous avons pris les moyennes des pressions constatées *(tableau n° 11)*. Le diagramme des

Essais comparatifs de choc et de pression.

Tableau n° 10

DÉSIGNATION ET MARQUES de l'éprouvette	POIDS du marteau	HAUTEUR de chute	ÉNERGIE du MARTEAU T_m	PRESSION à la presse	PÉNÉTRATIONS ou réduction d'épaisseur	ÉNERGIE de la presse T_p	RAPPORT $\frac{T_p}{T_m}$
	Kg.		Kg.		mm	Kg.	
Pénétration d'un poinçon de 20mm	15	0,50	7,5	309,9	4,6	1,42	0,189
de diam. dans une	15	0,75	11,25	619,8	5	3,09	0,275
barre de plomb	15	1,00	15	774,7	5,7	4,41	0,295
de 30/30 (1).	15	1,50	22,5	1239,6	8,2	10,17	0,445
	15	2,00	30	1394,5	12,6	17,35	0,578
Éprouvette de plomb cylindrique de 100mm de	3.500	0,250	875	30.000	32	960	1,1
diam. sur 100mm	3.500	0,500	1.750	46.000	43,5	2.000	1,14
de haut (2).	3.500	1,00	3.500	59.000	61	3.599	1,02
Éprouvettes d'acier chauffées au rouge cerise clair,	3.500	0,500	1.750	42.000	17,5	735	0,417
dimens. comme	3.500	1,00	3.500	59.000	26,5	1563,5	0,447
les précéd^{tes} (2).	3.500	1,500	5.250	80.000	35,5	2.840	0,53
Éprouvette de plomb aplatie transversalement aux génératrices (2).	3.500	0,500	1.750	40.000	42	1.680	0,42
Éprouvette d'acier, etc. (2).	3.500	1,00	3.500	73.000	36	2.628	0,358
Enfoncement de 2 tasseaux dans des blocs d'acier chauffés (2).	3.500	1,00	3.500	53.000	37	1.961	0,56

Observations.

(1) ESSAIS DE MM. CASALONGA *(Fig. 35)*.

La courbe C de l'épure a pour ordonnées les valeurs de l'énergie de la presse. La courbe D se rapporte à l'énergie du marteau. La courbe E a pour ordonnées les valeurs des rapports $\frac{Tp}{Tm}$.

(2) ESSAIS DE M. CHÔMIENNE.

Il ne faut pas perdre de vue que les énergies de la presse, calculées avec les efforts maxima, ont des valeurs trop grandes d'environ 1/2. C'est pourquoi les rapports $\frac{T_p}{T_m}$ sont supérieurs à l'unité, ce qui ne saurait être. De même pour les essais sur l'acier, les énergies T_p sont trop élevées, et, par suite, les rapports trop grands. Ces rapports sont cependant comparables entre eux, bien que relatifs. Leur valeur exacte doit être voisine de 0,50.

Les essais isolés ne peuvent faire ressortir que le rapport $\frac{T_p}{T_m}$, sans indication possible de loi, d'autant plus qu'ici encore les valeurs des efforts à la presse sont trop éloignées de leur valeur moyenne pour en déduire à peu près l'énergie utile dépensée par la presse.

Essais à la presse (machine à essayer les métaux de M. Delaloe).

Tableau n° 11.

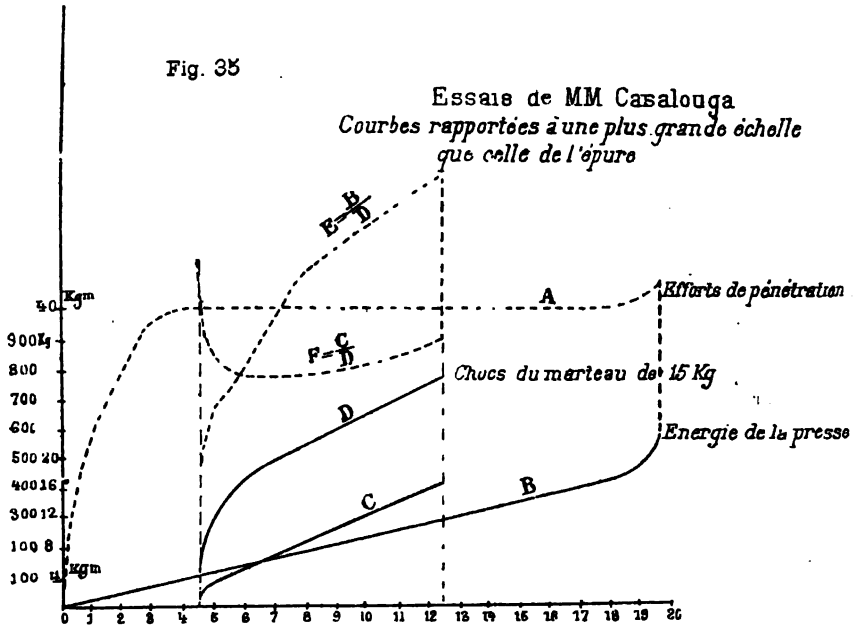
DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	CHARGES successives	PÉNÉTRATIONS	ÉNERGIE dépensée	RAPPEL DE L'ESSAI AU CHOC — POIDS du mouton	HAUTEUR de chute	PÉNÉTRATION	ÉNERGIE	ÉNERGIE de la presse	RAPPORTS $\frac{Tp}{Tm}$
			Kgm.			mm	Kgm		
Poinçon en fer de 20mm de diamètre dans une barre de plomb de 30/30.	100	0,1							
	200	0,2							
	300	0,3							
	400	0,5							
	600	1	0,4						
	800	2	1,1						
La durée de cet essai a été de 5'32".	950	3	1,98						
	950	4	2,93						
(Trois essais de même durée ont donné des résultats pour ainsi dire identitiques.)	950	4,6	»	15	0,50	4,6	7,5	3,5	0,467
	950	5	3,90	15	0,75	5	11,25	3,9	0,347
	950	5,7	»	15	1,00	5,7	15	4,58	0,306
	950	6	4,87						
	950	7	5,84						
	950	8	6,81						
	950	8,2	»	15	1,50	8,2	22,5	7	0,312
	950	9	7,78						
	950	10	8,75						
	950	11	9,72						
	950	12	10,69						
	950	12,4	»	15	2	12,4	30	11,08	0,366
	950	13	11,66						
	950	14	12,63						
	950	15	13,60						
	950	16	14,57						
	950	17	15,54						
	950	18	16,51						
	1.000	19	17,50						
	1.250	20	18,56						
	1.280	21	19,61						
	1.300	22	20,78						
	1.350	23	22,16						
	1.400	24	23,63						
	1.450	25	25,16						

pressions ou efforts de pénétration est indiqué sur l'épure *(fig. 35)* par la courbe A. On peut remarquer ce fait assez curieux que l'effort reste constant pendant la plus grande partie de l'enfoncement du poinçon, le métal se refoulant dans

Fig. 35

Essais de MM Casalonga

Courbes rapportées à une plus grande échelle que celle de l'épure



la masse en donnant lieu à des déformations très intéressantes, mais qu'il serait trop long de rappeler ici.

De la courbe des pressions rapportée aux longueurs d'enfoncement, nous avons déduit les valeurs successives de l'énergie utile dépensée qui sont celles des ordonnées de la courbe B.

Les valeurs des rapports $\frac{T_p}{T_m}$ sont quelque peu différentes de celles accusées par MM. Casalonga, ainsi que l'indiquent les chiffres et les courbes E et F de l'épure.

Essais de M. Chômienne.

Les essais de chocs et de compression faits par M. Chômienne sur des cylindres de plomb de 100^{mm} de diamètre et de 100^{mm} de hauteur donnent : pour les chocs, la courbe H *(fig. 1, pl. IV)*; pour les pressions, la courbe d'énergie G.

Il ne faut pas perdre de vue que les énergies de la courbe G sont trop élevées, puisque ce sont les valeurs finales maxima qui entrent comme facteurs. On ne saurait, *a priori*, concevoir que le choc demande moins d'énergie que la pression lente, ce que font ressortir les valeurs $\frac{T_p}{T_m} = 1{,}1, \quad 1{,}14, \quad 1{,}02.$

Ces valeurs montrent, néanmoins, que l'énergie de la presse actionnée par une pression de valeur constante, c'est-à-dire débitant son énergie à plein régime, dépenserait plus qu'un pilon à vapeur détendue.

Pour obtenir des chiffres plus précis, nous avons comprimé une éprouvette de plomb à la machine à essayer, de dimensions 100^{mm} de diamètre sur 100^{mm} de hauteur.

Les éléments de cet essai sont notés dans le *tableau n° 12*. L'épure *(fig. 1, pl. IV)* indique la courbe des pressions I dont nous avons déduit la courbe d'énergie J à allure très régulière, s'écartant sensiblement de la courbe G. Nous avons trouvé des rapports $\frac{T_p}{T_m}$ qui donnent la courbe K présentant une loi décroissante et non pas croissante comme la courbe E.

De cet essai, il faut retenir que la valeur moyenne du rapport $\frac{T_p}{T_m}$ est voisine de 0,50, c'est-à-dire que, dans le cas de l'éprouvette de plomb considérée, l'énergie à dépenser avec le marteau est double de l'énergie utile dépensée par la presse, et qu'il y a avantage à opérer, sur un métal mou, avec des coups de faible énergie plutôt qu'avec des coups de grande

Éprouvette de plomb de 100mm de diamètre.

Tableau n° 12 — *A*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	PRESSE			RAPPEL DES ESSAIS DE M. CHOMIENNE				ÉNERGIE de la presse T_p	RAPPORTS $\frac{T_p}{T_m}$
	PRESSIONS successives	RACCOURCISSEMENT	ÉNERGIE dépensée	POIDS du marteau	HAUTEUR de chute	RACCOURCISSEMENT	ÉNERGIE T_m		
		mm	Kgm	Kg			Kgm		
Compression d'une éprouvette de plomb coulé. Hauteur : 100mm Diamètre : 100mm	4.000	0,5							
	6.000	1							
	8.000	2	10,5						
	9.600	3							
	10.500	4	26						
	11.000	5							
	11.700	6	38						
	12.100	7							
	12.900	8	81						
	13.700	9							
	14.400	10							
	15.000	11							
	15.500	12	141						
	15.750	13							
	15.900	14	174						
	16.400	15							
	17.500	16	211						
	17.700	17							
	19.500	18	249,5						
	20.000	19							
	20.800	20	290						
	21.200	21							
	21.700	22	332						
	22.300	23							
Durée de l'essai à la réduction de 24mm = 11′.	22.700	24	376						
	23.200	25							
	23.600	26	422						
	24.000	27							
	24.300	28	470						
	24.700	29							
	25.100	30	519,5						
	25.500	31							
	26.000	32	570,5	3.500	0,250	32	875	570,5	0,651

Éprouvette de plomb de 100mm de diamètre.

Tableau n° 12 — *B*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	PRESSE			RAPPEL DES ESSAIS DE M. CHOMIENNE				ÉNERGIE de la presse Tp	RAPPORTS $\frac{Tp}{Tm}$
	PRESSIONS successives	RACCOURCISSEMENT	ÉNERGIE dépensée	POIDS du marteau	HAUTEUR de chute	RACCOURCISSEMENT	ÉNERGIE Tm		
		mm	Kgm	Kg			Kgm		
	26.400	33							
	26.700	34	623						
	27.000	35							
	27.300	36	677						
	27.700	37							
	28.100	38	732,5						
	28.400	39							
	28.700	40	789,5						
	29.000	41							
	29.300	42	847						
	29.600	43		3.500	0,500	43	1.750	890	0,51
	29.800	44	906						
	30.100	45							
	30.300	46	966						
	30.500	47							
	30.800	48	1.027						
	31.200	49							
Durée de l'essai à ce moment : 28'.	31.500	50	1.089						
	31.800	51							
	32.000	52	1.152						
	32.300	53							
	32.700	54	1.215						
	33.000	55							
	33.300	56	1.280						
	33.700	57							
	34.000	58	1.345						
	34.300	59							
	34.700	60	1.412						
	35.100	61		3.500	1,000	61	3.500	1.450	0,414
	35.500	62	1.479						
	36.000	63							
Durée totale de l'essai : 52'.	36.500	64	1.548						

énergie; un même marteau agissant sur une même chabotte donnera un meilleur rendement à faible vitesse ou petite hauteur de chute, qu'à grande vitesse obtenue soit par grande hauteur de chute, soit par action mécanique auxiliaire comme dans les pilons à double effet.

Essais de chocs répétés.

En vue de comparer les effets du gros marteau de 3.500^{kg} sur l'éprouvette de plomb de 100^{mm} de hauteur et de 100^{mm} de diamètre, avec ceux produits par un marteau de 30^{kg} tombant de 1^{m} de hauteur, donnant des coups répétés jusqu'à obtenir une déformation totale égale à celle d'un seul coup de marteau de 3.500^{kg} tombant aussi de 1^{m}, nous avons opéré sur une éprouvette de ces dimensions.

Les résultats de cet essai, indiqués dans le tableau n° 13, ont donné la courbe R qui s'écarte très peu du point donné par le gros marteau, dont l'ordonnée correspond à l'abscisse 61^{mm}.

Ce résultat est excessivement curieux; il confirme bien la règle : que, sur un métal malléable, le rendement d'un petit marteau travaillant à coups répétés est plus grand qu'avec un gros marteau travaillant d'un seul coup.

Cet essai est surtout remarquable par le grand rapport des poids des marteaux $\frac{3.500}{30} = 116$.

La courbe S correspond à un essai supplémentaire fait sur une éprouvette de mêmes dimensions que celles des précédentes, avec un poids de 30^{kg} tombant de 8^{m} de hauteur et dont les résultats sont aussi indiqués dans le tableau n° 13. La courbe S montre bien l'influence de la vitesse du marteau. Le rendement est moins élevé à grande vitesse qu'avec une vitesse moindre, ce qui confirme de nouveau la règle précitée se rapportant à un métal malléable.

Le tableau n° 13 indique aussi les rapports $\frac{T_p}{T_m}$. La courbe T

Essais de chocs répétés (marteau de 30kg).

Tableau n° 13 — *A*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	HAUTEUR DE CHUTE = 1m			
	RÉDUCTIONS	ÉNERGIE du marteau T_m	ÉNERGIE de la presse T_p	RAPPORTS $\frac{T_p}{T_m}$
Éprouvette de plomb cylindrique. Hauteur = 100mm. Diamètre = 100mm.	1,3	30	4,5	0,15
	3	60	15	0,25
	4	90	26	0,29
	5,2	120	35	0,292
	6,2	150	44	0,293
	7	180	65	0,36
	7,6	210		
	8,5	240		
	9,8	270		
	11	300	122	0,405
	11,8	330		
	12,9	360		
	13,5	390		
	14,5	420		
	15,2	450		
	15,8	480		
	16,4	510		
	17,5	540		
	18,2	570		
	19	600	265	0,44
	19,7	630		
	20,5	660		
	21,2	690		
	21,8	720		
	22,6	750		
	23,2	780		
	23,8	810		
	24,5	840		
	25,3	870		
	25,9	900		
	26,6	930		
	27,2	960		
	28	990	470	0,474
	28,5	1.020		
	29,2	1.050		
	30,1	1.080		
	30,6	1.110		
	31	1.140	540	0,475

Essais de chocs répétés (marteau de 30kg).

Tableau n° 13 — *B*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	HAUTEUR DE CHUTE = 1m			
	RÉDUCTIONS	ÉNERGIE du marteau T_m	ÉNERGIE de la presse T_p	RAPPORTS $\frac{T_p}{T_m}$
Éprouvette de plomb cylindrique. Hauteur = 100mm. Diamètre = 100mm.	31,7	1.170		
	32,2	1.200	576	0,48
	32,6	1.230		
	33,2	1.260		
	33,8	1.290		
	34,4	1.320		
	34,9	1.350		
	35,4	1.380		
	35,8	1.410		
	36,4	1.440		
	36,8	1.470		
	37,2	1.500		
	37,6	1.530		
	38	1.560	732,5	0,472
	38,5	1.590		
	39	1.620		
	39,5	1.650		
	40	1.680	789,5	0,47
	40,5	1.710		
	41,1	1.740		
	41,5	1.770		
	42	1.800	847	0,47
	42,5	1.830		
	43	1.860		
	43,5	1.890		
	44	1.920	906	0,47
	44,5	1.950		
	45	1.980		
	45,4	2.010		
	45,8	2.040		
	46,1	2.070		
	46,4	2.100		
	46,7	2.130		
	47	2 160		
	47,4	2.190		
	47,7	2.220		
	48,1	2.250		
	48,5	2.280		

Essais de chocs répétés (marteau de 30kg).

Tableau n° 13 — C

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	HAUTEUR DE CHUTE = 1m			
	RÉDUCTIONS	ÉNERGIE du marteau T_m	ÉNERGIE de la presse T_p	RAPPORTS $\frac{T_p}{T_m}$
Éprouvette de plomb cylindrique. Hauteur = 100mm. Diamètre = 100mm.	49	2.310		
	49,4	2.340		
	49,9	2.370		
	50,2	2.400	1.110	0,464
	50,5	2.430		
	50,8	2.460		
	51,2	2.490		
	51,5	2.520		
	51,8	2.550		
	52,1	2.580		
	52,5	2.610		
	52,9	2.640		
	53,3	2.670		
	53,7	2.700		
	54	2.730	1.215	0,45
	54,4	2.760		
	54,7	2.790		
	55,1	2.820		
	55,5	2.850		
	55,8	2.880		
	56,1	2.910	1.190	0,41
	56,4	2.940		
	56,8	2.970		
	57,1	3.000		
	57,4	3.030		
	57,7	3.060		
	58	3.090	1.345	0,43
	58,3	3.120		
	58,6	3.150		
	58,9	3.180		
	59,3	3.210		
	59,6	3.240		
	59,9	3.270		
	60,2	3.300		
	60,5	3.330		
	60,8	3.360		
	61,1	3.390	1.450	0,424
	61,4	3.420		

Essais de chocs répétés (marteau de 30kg).

Tableau n° 13 — D

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	HAUTEUR DE CHUTE = 8m			
	RÉDUCTIONS	ÉNERGIE du marteau Tm	ÉNERGIE de la presse Tp	RAPPORTS $\frac{Tp}{Tm}$
Éprouvette de plomb cylindrique. Hauteur = 100mm. Diamètre = 100mm.	8,2	240	88	0,367
	14,5	480	180	0,375
	20,5	720	300	0,415
	25	960	400	0,416
	29,6	1.200	512	0,428
	34	1.440	623	0,435
	37,6	1.680	722	0,43
	41,5	1.920	830	0,434
	44,6	2.160	932	0,434
	48,2	2.400	1.085	0,452
	51,5	2.640	1.130	0,43
	53,5	2.880	1.200	0,415
	55	3.120	1.350	0,432
	59,5	3.360	1.400	0,416
	62	3.600	1.479	0,41

Observations.

Ces essais ont montré que les déformations avec la hauteur de chute de 1m sont plus régulières qu'avec la hauteur de 8m.

La surface latérale des éprouvettes ne reste pas lisse, elle est très accidentée, ainsi que le montre la *figure 36* ci-dessous, sur laquelle nous avons indiqué les déformations prises par des lignes primitivement droites suivant les génératrices.

Eprouvette de plomb battue par le marteau avec Chutes de 8m00

Fig. 36 *Echelle 1/2*

de l'épure se rapporte aux rapports des ordonnées des courbes $\frac{J}{R}$ et montre que si les valeurs croissent dans les premiers chocs, elles restent sensiblement constantes, puis décroissent aux fortes déformations. Les premiers coups sont donc de rendement un peu moins élevé que ceux qui correspondent à des déformations ultérieures.

Ces essais font encore constater que le gros marteau de 3.500^{kg} avec coups de chutes progressives inférieures à 1^{m}, serait plus avantageux que le marteau de 30^{kg} avec chutes répétées de 1^{m} ou avec chutes répétées de 8^{m}. Il faut remarquer que les différences ne sont pas grandes et que, pratiquement, en tenant compte de la durée du martelage, surtout lorsqu'on opère à chaud, alors que la température s'abaisse rapidement, il convient d'agir sans perte de temps, il convient d'employer de préférence un marteau puissant, un marteau de masse en rapport avec celui de la pièce.

Ajoutons qu'avec un marteau de 30^{kg} tombant de 1^{m} à coups répétés, on peut poursuivre la réduction d'épaisseur, alors qu'une presse de 40.000^{kg} devient impuissante. Ces deux chiffres, 30^{kg} et 40.000^{kg}, ont leur éloquence.

Les essais de M. Chômienne sur des éprouvettes d'acier chauffées au rouge cerise clair ont donné des éléments qui concordent bien, et, nous basant sur les chiffres qu'il a indiqués, nous en avons déduit les rapports $\frac{T_p}{T_m}$ donnant lieu à une loi légèrement croissante *(tableau n° 10 et épure fig. 1, planche IV)*.

La courbe L est celle des énergies du marteau; la courbe M est celle des énergies de la presse.

Les rapports $\frac{T_p}{T_m}$ donnent la courbe N dont les ordonnées sont encore assez voisines de la valeur 0,50.

Il ressort de ces essais sur de l'acier, métal possédant encore une certaine élasticité au rouge cerise, qu'il y a avantage à se

servir du marteau, en donnant les coups les plus énergiques, ceux correspondant, pour un même marteau, à la plus grande vitesse de chute.

Cette règle est donc opposée à celle indiquée par les essais sur le plomb ; elle sera confirmée plus loin par nos essais, de même que la précédente.

Il convient de vérifier cette loi, car les efforts de la presse indiqués sont des valeurs maxima de fin de déformation ou de réduction considérée, donnant des énergies notées dans le tableau avec une valeur trop forte d'environ moitié, de sorte que les rapports $\frac{T_p}{T_m}$ sont trop grands et ne peuvent être que relatifs.

Rapport des énergies dépensées pour le plomb et l'acier au rouge cerise.

Ce qu'il y a de particulièrement intéressant dans ces essais, c'est qu'ils permettent d'établir exactement, au moins pour une valeur de la réduction, soit celle de 32^{mm}, le rapport des énergies dépensées par le marteau pour le plomb et pour l'acier au rouge cerise.

Pour le plomb, l'énergie donnant une réduction de 32^{mm}, s'élève à 875^{kgm}.

Pour l'acier, en considérant la courbe L, on peut admettre pour cette même réduction une énergie de 4.570^{kgm}, soit un rapport $\frac{\text{plomb}}{\text{acier au rouge cerise}} = \frac{875}{4.570} = 0{,}191$, soit 0,2, *c'est-à-dire qu'il faut cinq fois plus d'énergie* pour marteler l'*acier au rouge cerise* que pour *marteler le plomb*.

Les autres essais indiqués au tableau n'ayant été faits que sur une seule éprouvette ne permettent pas d'établir une comparaison utile.

Essais de compression et de chocs répétés (poids du mouton : 11kg).

Tableau n° 14. A.

DÉSIGNATION ET MARQUES DE L'ÉPROUVETTE	ESSAI DE COMPRESSION A LA MACHINE A ESSAYER						Énergie des coups de 1mm de hauteur T_1	Rapport $\frac{T_p}{T_1}$	Énergie des coups de 8mm de hauteur T_8	Rapport $\frac{T_p}{T_8}$
	Réductions	Charge	Énergie T_p	Diamètre moyen de contact	Surface	Charge par mill. carré				
Éprouvette de plomb cylindrique.	0,25	450								
	0,5	600								
Hauteur = 34,5.	1	800		38,4	1.158	0,69				
Diamètre = 38,4.	2,5	1.400	2,4							
La section primitive étant 1158mm², la pression par millimètre carré correspondant à la réduction de 1mm est	3,5	1.650	3,4	40	1.256	1,3	13	0,26		
	4,5	1.900								
	5,5	1.960	6,4				22	0,292		
	6,5	1.960								
	7,5	1.960								
$\frac{800}{1.158} = 0^{kg},69.$	8,5	2.250								
	9,5	2.290	16				41	0,39		
(1) Durée de l'essai à ce point : 8 min.	10,5	2.410		44	1.520	1,58				
(2) Durée de l'essai à ce point : 15 min.	11,5(1)	2.500								
(3) Durée de l'essai à ce point : 20 min.	12,5	2.690	23,4				56	0,418		
(4) Durée totale de l'essai : 33 min.	13,5	2.770	27						94	0,277
	14,5	3.400								
Diamètre de l'éprouvette = 101mm.	15,5	3.510	32,2	50	1.963	1,79	75	0,423		
Soit une surface de 8.012mm² et une pression par millimètre carré	16,5	3.700								
	17,5	4.000								
	18,5	4.500								
$= \frac{44.000}{8.012} = 5^{kg},5.$	19,5(2)	5.250								
	20,5	5.700	53	57	2.552	2,23	122	0,434	192	0,276
	21,5	6.600								
	22,5	7.450	68	62	3.019	2,47	150	0,453	236	0,288
	23,5	8.300								
	24,5	9.700	84	68	3.632	2,68	193	0,435	292	0,288
	25,5(3)	11.900	93,5							
	26,5	13.950	107	73	4.285	3,30	268	0,398	390	0,274
	27,5	17.850	124							
	28,5	22.850	141	84	5.542	4,1				
	29,5	31.000	167							
	30,5(4)	44.000	207	101	8.012					

Essais de compression et de chocs répétés (poids du mouton 11^{kg}).

Tableau n° 14 *B*.

DÉSIGNATION ET MARQUES DE L'ÉPROUVETTE	HAUTEUR DE CHUTE CONSTANTE = 1^{m}				
	Hauteurs successives de l'éprouvette	Diamètre au milieu de la hauteur	Diamètre moyen des bases	Réductions de la hauteur	Énergie dépensée
Éprouvettes de plomb cylindriques de même hauteur : 34,5, et de même diamètre : 38,4.	34,5	38,4	38,4	»	»
	31,3	41,8	40	3,2	11
	23,9	42,7	41,1	5,6	22
	26,3	45,3	42,2	8,2	33
(Les valeurs mesurées sont des moyennes de deux ou de trois essais.)	24,2	46,9	43,7	10,3	44
	22,1	48,8	45,5	12,4	55
	20,2	52,6	48	14,3	66
	18,6	54,8	49,5	15,7	77
	17,3	56	51,5	17,2	88
	15,7	58,5	53,8	18,8	99
	15	59,6	55	19,5	115
	14,1	61,8	57	20,4	121
	13,3	63,7	59	21,2	132
	12,4	65,5	60,8	22,1	143
	11,7	67,4	63	22,8	154
	11,2	69	65	23,3	165
	10,7	70	66,5	23,8	176
	10,3	71,5	67,5	24,2	187
	9,8	73	68	24,7	198
	9,6	75	71	24,9	209
	9,2	76,5	72	25,3	220
	9,0	78,5	74	25,5	231
	8,5	80	76	26	242
	8,3	82	78	26,2	253
	8,1	83	80	26,4	264
	7,9	83,5	81,5	26,6	275

Essais de compression et de chocs répétés (poids du mouton : 11kg).

Tableau n° 14 *C.*

DÉSIGNATION ET MARQUES DE L'ÉPROUVETTE	HAUTEUR DE CHUTE = 2m		
	HAUTEURS de l'éprouvette	RÉDUCTIONS de la hauteur	ÉNERGIE dépensée
Éprouvettes de plomb cylindriques de même hauteur : 34,5, et de même diamètre : 38,4.	34,5	»	»
	29,5	5	22
	25,1	9,4	44
	21,8	12,7	66
(Les valeurs mesurées sont des moyennes de deux ou de trois essais.)	18,8	15,7	88
	16,6	17,9	110
	14,8	19,7	132
	14,3	20,2	154
	12,2	22,3	176
	11,1	23,4	198
	10,2	24,3	220
	9,4	25,1	242
	8,9	25,6	264
	8,2	26,3	286
	7,8	26,7	308
	HAUTEUR DE CHUTE = 3m		
	34,5	»	»
	28,1	6,4	33
	22,7	11,8	66
	18,8	15,7	99
	16	18,5	132
	13,8	20,7	165
	12,2	22,3	198
	10,6	23,9	231
	9,5	25	264
	8,7	25,8	297
	7,8	26,7	330
	7,3	27,2	363

Essais de compression et de chocs répétés (poids du mouton : 11^{kg}).

Tableau n° 14 *D.*

DÉSIGNATION ET MARQUES DE L'ÉPROUVETTE	HAUTEURS de l'éprouvette	RÉDUCTIONS de la hauteur	ÉNERGIE dépensée
	HAUTEUR DE CHUTE = 6^{m}		
Éprouvettes de plomb cylindriques de même hauteur : 34,5, et de même diamètre : 38,4. (Les valeurs mesurées sont des moyennes de deux ou de trois essais.)	34,5	»	»
	23,7	10,8	66
	17,1	17,4	132
	13,9	20,6	198
	10,2	24,3	264
	8,4	26,1	330
	7,3	27,2	396
	6,5	27,9	462
	HAUTEUR DE CHUTE = 8^{m}		
	34,5	»	»
	22,7	12,8	88
	14,9	19,6	176
	10,8	23,7	264
	8,5	26	352
	7,3	27,2	440

DÉSIGNATION ET MARQUES DE L'ÉPROUVETTE	ÉLÉMENTS DES RAPPORTS DES ÉNERGIES POUR LES HAUTEURS DE 1^{m} ET DE 8^{m}			
	RÉDUCTIONS	T_1	T_8	$\frac{T_8}{T_1}$ (1)
Éprouvettes de plomb cylindriques de même hauteur 34,5, et de même diamètre 38,4. (Les valeurs mesurées sont des moyennes de deux ou de trois essais.)	12,8	57	88	1,54
	16	78	125	1,60
	18	95,5	152	1,59
	20	117	184	1,58
	24	182	278	1,52
	26	244	355	1,46

(1) T_1 Energie du marteau tombant de 1^{m}.
T_8 Energie du marteau tombant de 8^{m}.

Observations.

Les diamètres successifs pris par les éprouvettes sous l'action du choc n'ont été indiqués que pour la hauteur de chute de 1^{m}.

Les déformations pour les autres hauteurs sont tout à fait analogues. Ces déformations se produisent avec une régularité relativement remarquable.

Avec la presse, on constate que l'éprouvette est sensiblement plus élargie du côté de la tête mobile que du côté de la tête fixe, phénomène qui se produit aussi, et d'une façon plus accentuée, avec le marteau, si l'on n'a pas soin de retourner l'éprouvette de manière à rétablir autant que possible la symétrie. Dans les divers essais de compression de cylindres, les éprouvettes ayant subi de fortes réductions de hauteurs présentent une section ovale.

ESSAIS DE CHOCS RÉPÉTÉS AVEC UN MÊME MARTEAU ET EN FAISANT VARIER LES HAUTEURS DE CHUTE

Ces essais ont été faits sur des éprouvettes de plomb tournées, au plus près des mêmes dimensions, qui ne différaient entre elles que de 1 à 2 dixièmes au plus. Ces éprouvettes ont été prises dans une même table de plomb laminé en les débitant dans une barre tournée et en les rectifiant.

Les éléments mesurés indiqués dans le tableau n° 14 sont des moyennes de deux ou trois essais qui ont d'ailleurs présenté une uniformité ou une variation continue remarquable, de sorte que les courbes régulières tracées s'écartent très peu des points irréguliers.

A chaque coup de mouton, l'éprouvette était retournée de manière à lui conserver le plus de symétrie possible.

L'épaisseur était toujours mesurée au centre de l'éprouvette, les bords présentant des inégalités atteignant parfois un demi-millimètre et quelquefois 1^{mm}, ce qu'il est assez difficile d'éviter dans de tels essais, mais que les moyennes de plusieurs essais permettent de rectifier.

Si nous considérons la courbe A *(fig. 2, pl. IV)* se rapportant aux chutes répétées de 1^{m} de hauteur, nous pouvons remarquer sa régularité presque mathématique et sa forme convexe du côté de l'axe des abscisses, montrant que la variation de l'énergie, pour obtenir des réductions proportionnelles, croît très rapidement, et qu'elle tend vers une valeur infinie lorsque l'épaisseur se réduit à zéro, lorsque la réduction d'épaisseur a pour valeur la hauteur primitive de l'éprouvette. Cette courbe a pour asymptote l'ordonnée qui correspond à la hauteur (34,5).

Les courbes correspondant aux hauteurs 2^{m}, 3^{m}, 6^{m} et 8^{m} sontbien distinctes et ne se coupent pas. Elles montrent qu'avec un même poids, pour produire des mêmes déformations, il fau plus d'énergie, lorsque la hauteur de chute est plus grande.

Il est donc préférable de marteler du plomb par de nombreux coups répétés plutôt que par un petit nombre de coups de plus grande puissance vive.

La perte d'énergie est plus grande dans ce dernier cas, et cette perte doit se retrouver : 1° en vibrations plus intenses de l'enclume, ce que l'on constate aisément par la sonorité plus grande du choc ; 2° en chaleur ou température plus élevée que l'on apprécie au toucher facilement. Ainsi, l'éprouvette soumise à l'action des chutes de 1^m n'était pas échauffée, tandis que celle subissant les chutes de 6^m présentait une température de 40 à 60 degrés aux premiers coups de mouton.

Ces courbes font nettement ressortir l'influence de la vitesse de choc, tout comme les essais de compression à la machine à essayer l'ont également montré.

L'inertie de la matière intervient également pour résister avec plus d'intensité quand la vitesse est plus grande.

Nous avons aussi noté dans le tableau n° 14 la variation du rapport des énergies pour les chutes de 1^m et de 8^m (courbe L de l'épure). Les différentes valeurs portées en ordonnées accusent une courbe L de forme parabolique, dont l'ordonnée maximum est voisine de l'abscisse ayant pour valeur la moitié de la hauteur de l'éprouvette. C'est donc vers cette réduction de hauteur que le rendement du marteau tombant de 5^m par rapport au marteau tombant de 1^m est minimum.

Si nous considérons les réductions correspondant à chaque premier coup du marteau tombant des hauteurs 1, 2, 3, 6 et 8^m, les rapports des énergies sont $\frac{T_p}{T_m}$ indiqués ci-dessous.

Hauteurs de chute. . .	1^m	2^m	3^m	6^m	8^m
Energie T_m.	11^{kgm}	22	33	66	88
Energie T_p.	$2^{kgm}8$	5,8	9	18	24
Rapport $\frac{T_p}{T_m}$	0,254	0,263	0,273	0,272	0,273
Réductions.	$3^{mm}2$	5^{mm}	$6^{mm}4$	$10^{mm}8$	$12^{mm}8$

La courbe K représente la variation de $\frac{T_p}{T_m}$.

Cette courbe passe évidemment par les origines des rapports $\frac{T_p}{T_1}$, $\frac{T_p}{T_8}$...

On voit que le rapport $\frac{T_p}{T_m}$ a une valeur à peu près constante, que s'il tend à s'élever au début, dans les parties difficiles à mesurer avec précision, il se rapproche du rapport $\frac{T_p}{T_8}$ et la courbe K prend une allure peu différente, qui donnerait lieu, si on possédait les éléments pour la prolonger, à une constance de l'ordonnée. La constance des ordonnées des différentes courbes I, J, K, dans les parties finales, est d'ailleurs indiquée par la forme hyperbolique à asymptote commune que présentent les courbes d'énergie. La courbe d'énergie F de la presse a été déduite de la courbe des pressions G dont les abscisses sont les réductions de hauteur et les ordonnées les intensités des effets de compression.

Les éléments de ces courbes sont également indiqués dans le tableau n° 14, qui fait ressortir les charges par millimètre carré de base d'appui de l'éprouvette (courbe H).

On voit que la pression de début s'élevant à $0^{kg},69$ pour une réduction de 1^{mm}, s'élève à $5^{kg},5$ pour une réduction de $30^{mm},5$. La courbe H indique les variations. Nous avons encore indiqué les rapports $\frac{T_p}{T_1}$ et $\frac{T_p}{T_8}$ relatifs aux énergies de la presse et du marteau aux hauteurs de 1^m et de 8^m. Les courbes I et J se rapportent à la variation de chacun d'eux. On peut remarquer que le rapport $\frac{T_p}{T_1}$ croît quelque peu jusqu'à une réduction de 11^{mm}, puis la progression est plus faible pour passer par un maximum vers la réduction 22,5; ensuite, il décroît.

Le rapport $\frac{T_p}{T_8}$ est sensiblement constant dans les limites de l'essai, avec une valeur 0,28.

Ainsi, les rapports des énergies d'un même marteau à des vitesses différentes, à coups répétés ou non, tendent vers des valeurs constantes d'autant plus petites que la vitesse est plus grande en les rapportant à une commune mesure, celle de l'énergie dépensée par l'action d'une presse ; c'est-à-dire que le rendement du marteau agissant sur *un métal mou* est d'autant plus grand, l'enclume ne variant pas, que la *vitesse est plus faible.*

C'est ce que la pratique reconnaît en adoptant pour le travail du métal à chaud, des marteaux-pilons à simple effet, à petite vitesse, de préférence à des marteaux-pilons à double effet à grande vitesse.

C'est aussi pourquoi on préfère augmenter le poids du marteau plutôt que la hauteur de chute, pour augmenter la puissance du pilon.

Essais de chocs répétés avec un poids de 30^{kg}.

Les essais de chocs répétés avec un poids de 30^{kg} ont été faits en vue de rechercher l'influence de la variation du poids ou de la masse du marteau, la masse de l'enclume ne variant pas, l'enclume étant la même que celle pour le mouton de 11^{kg}. Les éprouvettes étaient identiques.

Le *tableau n° 15* note les éléments de ces essais faits avec une hauteur de chute de 1^{m} et de 8^{m}.

Les chutes de 1^{m} donnent la courbe M *(fig. 2, pl. IV)* qui coupe les courbes B, C, du poids de 11^{kg}, accusant ainsi que pour ces points on peut indifféremment utiliser le marteau de 11^{kg} ou celui de 30^{kg}.

La courbe M a des ordonnées qui croissent plus rapidement que celles des courbes A, B, C, D, E. Assez voisine de la courbe A pour les premières déformations, elle s'en éloigne et se rapproche des courbes D et E dans les réductions finales. Dans les réductions voisines de 15 à 25^{mm}, la courbe M montre que l'énergie d'un marteau de 30^{kg} à chutes de 1^{m} (30^{kgm})

Essais de chocs répétés (poids du marteau : 30kg)

Tableau n° 15

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	HAUTEUR DE CHUTE CONSTANTE = 1m						
	Hauteurs successives de l'éprouvette	Diamètre au milieu de la hauteur	Diamètre moyen des bases	Réduction de la hauteur	Énergie dépensée T_m	Énergie dépensée à la presse T_p	Rapport $\frac{T_p}{T_m}$
Éprouvettes de plomb cylindriques de même hauteur = 34,5 et de même diamètre = 38,4.	34,5	38,4	»	»	»	»	»
	27,6	44,5	41	6,9	30	10	0,333
	22,6	48	44,1	11,9	60	22	0,367
	19	54,2	47,5	15,5	90	32	0,356
	16,3	58,1	51,9	18,2	120	43	0,358
	14,3	61,4	56,8	20,2	150	53	0,354
	12	67,1	62	22,5	180	68	0,377
	10,7	70	66,8	23,8	210	79	0,377
	10,1	73	70	24,4	240	84	0,352
	9,2	76,5	73	25,3	270	93	0,345
	8,3	82,5	75,5	26,2	300	102	0,341
	7,9	84,5	81	26,6	330	107	0,325
	7,5	86	83,2	27	360	115	0,320
	7,1	90,5	86,9	27,4	390	122	0,314
	6,7	92	89	27,8	420	130	0,310
	6,4	95	92,5	28,1	450	134	0,298
	6,1	97,5	95	28,4	480	138	0,288
	5,9	99,5	»	28,6	510	142	0,278
	5,7	102	»	28,8	540	149	0,276
	5,5	104	»	29	570	153	0,268
	5,3	105	»	29,2	600	156	0,260
	5,1	108	»	29,4	630	162	0,257
	4,9	109	»	29,6	660	170	0,258

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	HAUTEUR DE CHUTE = 8m				
	Hauteurs successives de l'éprouvette	Réduction de la hauteur	Énergie dépensée T_m	Énergie de la presse T_p	Rapport $\frac{T_p}{T_m}$
Éprouvettes de plomb cylindriques de même hauteur = 34,5 et de même diamètre = 38,4.	34,5	»	»	»	»
	13,6	20,9	240	57	0,248
	8	26,5	480	106	0,222
	5,3	29,2	720	156	0,217

équivaut à un marteau de 11^{kg} à chutes de $2^{m},50$ ($27^{kgm},5$) dans les conditions où se sont faits les essais considérés. (Le rapport $\frac{30}{27.5} = 1,1$.)

On peut remarquer que la courbe M s'éloigne assez vite de la courbe A et, par suite, il est désavantageux d'employer pour un métal mou un gros marteau frappant un petit nombre de coups, plutôt qu'un petit marteau frappant un plus grand nombre de coups. La vitesse étant la même, c'est à la masse de l'enclume qu'il convient d'attribuer ces effets ; le rapport des masses de chaque marteau avec celle de l'enclume étant plus grand pour le gros marteau que pour le petit, l'effet utile est moins élevé pour le premier que pour le second.

On ne saurait faire entrer le poids de l'enclume ou sa masse, d'une part, et celle du sol, d'autre part, pour faire ressortir les différences sous forme de chiffres ; les phénomènes de choc et les conditions de stabilité des fondations sont trop variables et surtout difficiles à analyser.

Les écarts d'énergie s'accusent encore davantage avec le marteau de 30^{kg} et chutes de 8^{m} que fait ressortir la courbe N s'éloignant assez de la courbe E du poids de 11^{kg} et chutes de 8^{m} également.

Cependant, entre les courbes A et M de 1^{m} de chute et celles E et N de 8^{m} de chute, les écarts relatifs sont peu différents, ce qui démontrerait que, pour de faibles vitesses ou pour de grandes vitesses de deux marteaux de poids différents, la masse de l'enclume et des fondations possède sensiblement la même influence; c'est-à-dire que les courbes M et N sont simplement relevées d'ordonnées dans des proportions peu différentes, et que l'on retrouve des différences d'ordonnées entre A et E à peu près égales aux différences entre M et N.

En considérant les écarts des courbes A et M, on voit l'importance que prend la masse d'appui de la pièce, la chabotte

et ses fondations dont les déplacements élastiques, les vibrations absorbent une partie de l'énergie d'autant plus grande que le marteau est plus lourd.

On conçoit qu'il convient tout particulièrement de limiter les déplacements élastiques au minimum indispensable pour ne pas amener trop rapidement la rupture des organes, dans le cas d'un marteau-pilon; que le rendement du marteau sera augmenté avec la masse de la chabotte et des fondations; mais que le rendement sera surtout plus grand lorsqu'on opère à petite vitesse du marteau, lorsque les forces d'inertie des masses choquées n'interviennent que pour une faible part, lorsque les vibrations sont peu sensibles, lorsque le marteau se rapproche d'autant plus de l'action de la presse.

Le tableau n° 15 fait ressortir les rapports de l'énergie de la presse à celle du marteau de 30^{kg}.

Ces rapports donnent lieu aux courbes $\frac{F}{M}$ et $\frac{F}{N}$. La première a des ordonnées qui croissent, puis restent constantes jusqu'à la réduction de 20^{mm}. Elles croissent de nouveau au delà, pour décroître ensuite assez rapidement et tendre vers des valeurs voisines des courbes inférieures de même nature. La courbe $\frac{F}{N}$ décroît depuis son origine et tend également vers des valeurs d'ordonnées voisines des courbes précédentes.

La courbe passant par l'origine des courbes A, B, C, D, E, représente la variation de l'énergie dépensée en opérant sur des éprouvettes distinctes, mais identiques, et en faisant varier progressivement la hauteur de chute. Elle a également pour asymptote l'ordonnée extrême; elle passe par l'origine des axes coordonnés.

Elle montre qu'il faut plus d'énergie pour obtenir une même réduction de hauteur, en opérant d'un seul coup de hauteur suffisante, qu'en opérant par coups répétés de hauteur moindre. Ainsi pour une réduction de hauteur de $12^{m},8$ obtenue par un

seul coup du marteau de 11^{kg} tombant de 8^{m}, soit 88^{kgm}, il faut 82^{kgm} avec coups répétés de hauteur de chute égale à 6^{m}.

Il faut 74^{kgm} avec chute de 3^{m}
Il faut 67^{kgm} — 2^{m}
Il ne faut que 59^{kgm} — 1^{m}

Avec la presse il ne faut que 26^{kgm}.

Pour la hauteur de 8^{m} correspondant à la plus grande vitesse, on a :

$$\frac{\text{Energie du marteau}}{\text{Energie de la presse}} = \frac{88}{26} = 3{,}3.$$

Pour la hauteur de 1^{m}.

$$\frac{T_m}{T_p} = \frac{59}{26} = 2{,}28.$$

ESSAIS DE CHOCS RÉPÉTÉS SUR DU LAITON

Ces essais ont été faits sur des éprouvettes de laiton cylindriques de 20^{mm} de diamètre sur 20^{mm} de hauteur, découpées à la barre, le métal étant à la température ordinaire de 15° et n'ayant subi aucun recuit.

Trois séries de chocs ont été exécutées avec un poids de 11^{kg} tombant de hauteurs égales à 1^{m}, 4^{m} et 8^{m}.

Trois autres séries comportaient un poids de 30^{kg} tombant des même hauteurs 1^{m}, 4^{m} et 8^{m}.

Trois essais à la presse avec vitesse lente sensiblement constante ont servi de bases pour l'estimation des pressions et du travail devant servir de commune mesure aux essais aux chocs.

Tous les éléments de ces essais sont notés dans le tableau n° 16.

Signalons que, dans l'un des essais à la presse, vers la charge de 48.000^{kg}, l'éprouvette s'est rompue brusquement à la façon d'un cylindre de fonte. La machine à essayer n'étant que de 50^{t}, l'aplatissement n'a pu être poussé au delà d'une

épaisseur moindre de 9^{mm} pour les deux autres éprouvettes de compression.

L'épure *(fig. 1, pl. V)* montre que la courbe A des pressions comprend une partie rectiligne correspondant à la période dite élastique; puis la courbe tourne sa convexité vers l'axe des abscisses en ayant pour asymptote l'ordonnée d'abscisse égale à 20^{mm}. Cette ordonnée est aussi asymptote pour toutes les courbes d'énergie.

Essais de compression et de chocs répétés sur des éprouvettes de laiton.

Tableau n° 16 *A*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	COMPRESSION			
	HAUTEURS SUCCESSIVES	RÉDUCTIONS	PRESSIONS	ÉNERGIE CALCULÉE
Éprouvettes cylindriques de laiton Hauteur = 20^{mm} Diamètre = 20^{mm}	19,75	0,25	5.500	0,6
	19,5	0,5	10.100	2,5
	19	1	15.200	8,5
	18	2	16.800	24,5
	17	3	19.700	44
	16	4	22.700	63,6
	15	5	25.600	87,7
	14	6	28.700	114,7
	13	7	31.900	145
	12	8	37.700	179
	11	9	42.300	719
	10	10	46.000	264
	9,2 (1)	10,8	50.000	302

Observations.

(1) Le diamètre d'appui final était 28^{mm}.
La section d'appui final était 616$^{mm^2}$.
La pression par millimètre carré était 84^{kg}.
La pression par millimètre carré pour une réduction de 1 à 2^{mm} est d'environ R = 50^{kg}, la pression de début étant environ 20^{kg}.

Essais de compression et de chocs répétés sur des éprouvettes en laiton.

Tableau n° 16 *B*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	MARTEAU DE 11kg				
	HAUTEURS successives	RÉDUCTIONS	ÉNERGIE du marteau T_m	ÉNERGIE de la presse T_p	RAPPORT $\frac{T_p}{T_m}$
	HAUTEUR DE CHUTE = 1m				
Éprouvettes cylindriques de laiton	20	»	»	»	»
Hauteur = 20mm	19,5	0,5	11	2.5	0,227
Diamètre = 20mm	19,0	1	22	8.5	0,378
Poids de l'enclume : 140kg	18,6	1,4	33	14	0,425
	18,3	1,7	44	19	0,430
	18	2	55	24.5	0,445
	17,7	2,3	66	28	0,424
Dans ces essais, l'élasticité mise en jeu était telle que le mouton rebondissait.	17,3	2,6	77	37	0,48
	17,1	2,9	88	43	0,487
	16,8	3,2	99	49	0,494
	16,5	3,5	110	54	0,494
	16,2	3,8	121	61	0,505
	16	4	132	63.6	0,484
	15,8	4,2	143	67	0,468
	15,6	4,4	154	72	0,468
	15,3	4,7	165	78	0,474
	15,1	4,9	176	83	0,473
	14,9	5,1	187	87	0,466
	14,7	5,3	198	90	0,456
	14,5	5,5	209	97	0,465
	14,3	5,7	220	103	0,46
	14,1	5,9	231	108	0,46
	13,9	6,1	242	115	0,475
	13,8	6,2	253	117	0,46
	13,7	6,3	264	119	0,45
	HAUTEUR DE CHUTE = 4m				
	18,2	1,8	44	21	0,476
	17	2	88	44	0,50
	15,8	4,2	132	67	0,509
	14,8	5,2	176	88	0,50
	14,1	5,9	220	108	0,492
	13,3	6,7	264	137	0,518
	12,6	7,4	308	157	0,509
	12	8	352	179	0,509
	11,4	8,6	396	202	0,510
	HAUTEUR DE CHUTE = 8m				
	20	»	»	»	»
	17	3	88	44	0,50
	14,8	5,2	176	88	0,50
	13,1	6,9	264	141	0,532
	11,3	8,7	352	205	0,582

Essais de compression et de chocs répétés sur des éprouvettes en laiton.

Tableau n° 16 *C*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	POIDS DE 30 KILOGRAMMES				
	HAUTEURS successives	RÉDUCTIONS	ÉNERGIE du marteau Tm	ÉNERGIE de la presse Tp	RAPPORT $\frac{Tp}{Tm}$
	HAUTEUR DE CHUTE = 1m				
Éprouvettes cylindriques de laiton	20	»	»	»	»
Hauteur = 20mm	18,1	1,9	30	22	0,733
Diamètre = 20mm	17,1	2,9	60	43	0,716
Poids de l'enclume : 140kg	16,3	3,7	90	58	0,643
	15,5	4,5	120	74	0,618
	14,8	5,2	150	88	0,588
	14,3	5,7	180	103	0,572
	13,6	6,4	210	125	0,595
	13,1	6,9	240	141	0,588
	12,5	7,5	270	160	0,582
	11,9	8,1	300	180	0,600
	11,5	8,5	330	196	0,596
	11	9	360	219	0,608
	10,6	9,4	390	230	0,588
	10,2	9,8	420	260	0,618
	9,8	10,2	450	272	0,603
	9,5	10,5	480	289	0,600
	9,1	10,9	510	»	»
	8,8	11,2	540	»	»
	8,5	11,5	570	»	»
	8,2	11,8	600	»	»
	HAUTEUR DE CHUTE = 4m				
	20	»	»	»	»
	15,2	4,8	120	80	0,68
	12,4	7,6	240	164	0,685
	9,8	10,2	360	260	0,723
	9,2	10,8	400	302	0.756
	HAUTEUR DE CHUTE = 8m				
	20	»	»	»	»
	13,4	6,6	240	130	0,54
	9,2	10,8	480 (1)	302	0,63
	5,9	14,1	720 (2)	»	»

(1) La température de l'éprouvette était d'environ 100°.

(2) L'éprouvette est brisée en six morceaux; la température produite par le choc pouvait être d'environ 150°.

La courbe B est l'énergie à la presse.

Les courbes C, D, E correspondent à l'énergie du poids de 11^{kg} tombant de 1^m, 4^m, 8^m.

On peut remarquer que ces courbes se confondent vers leurs origines respectives et qu'elles ne s'écartent pas beaucoup dans les limites des essais, ce qui montre que, dans le cas d'un métal tel que le laiton, possédant une certaine élasticité et une assez grande résistance à la compression, l'effet utile varie peu avec un même poids de 11^{kg} et les éprouvettes essayées, alors même que la vitesse est assez variable : $4^m,50$ à 12^m.

On voit néanmoins qu'il y a avantage à employer un marteau à grande vitesse de préférence à un marteau à faible vitesse, règle entièrement opposée à celle déduite des essais avec un métal mou tel que le plomb.

Cette règle est d'accord avec celle observée en pratique pour le travail de l'acier, métal élastique, résistant, que l'on martèle de préférence avec des pilons à double effet ou à grande vitesse et à marteau de poids relativement peu élevé; règle également suivie pour le martelage du cuivre à froid avec des marteaux mécaniques de faible masse et de grande vélocité.

Les courbes F, G, H se rapportent au poids de 30^{kg} tombant des hauteurs 1^m, 4^m et 8^m sur la même enclume du poids de 140^{kg}.

On peut remarquer que la courbe C des chutes répétées de 4^m est, dans ce cas, la plus favorable et qu'elle s'écarte même sensiblement des deux autres dès l'origine et au delà; que les chutes de 1^m et de 8^m sont à peu près équivalentes dans les limites des essais; que la courbe H coupe la courbe E, ce qui indique que pour une même réduction de 9^{mm} à 10^{mm}, quinze coups de 1^m de chute équivalent sensiblement à deux coups de 8^m de chute.

La plus grande vitesse reprend son avantage lorsque la hauteur de l'éprouvette diminue, lorsque la résistance augmente fortement, lorsque le coup correspond à des pressions dépassant 50.000^{kg}.

Au delà de 12 et 14^{mm} de réduction, le choc produisait un résultat analogue à celui déterminé par la pression de la presse, c'est-à-dire que l'éprouvette se fendillait suivant une ou deux génératrices, puis se brisait; l'essai ne pouvant, dès lors, être poursuivi en vue d'obtenir des réductions plus faibles.

Les essais avec le poids de 30^{kg} montrent donc qu'il conviendrait de ne pas s'éloigner de la chute de 4^{m} pour obtenir le maximum de rendement.

Avec un métal tel que le laiton, un métal résistant, il convient d'employer un marteau de masse suffisante et de vitesse modérée. On voit que la courbe $\frac{B}{G}$ des rapports du marteau de 30^{kg} avec chutes de 4^{m} est d'un rendement moyen de 0,70, comparativement très élevé et qui ressort visiblement de l'écartement relativement peu prononcé des deux courdes B et G. On constate donc : que le rendement du martelage peut être assez voisin de celui de la presse quand on opère sur un métal résistant.

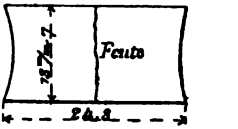
La pratique s'inspire encore de ce résultat en opéraut à la presse pour ébaucher les pièces, serrer le métal à haute température, puis en achevant, continuant l'opération, à température plus basse, avec le marteau. Les différentes courbes des rapports $\frac{T_p}{T_m}$, soit les courbes $\frac{B}{C}\,\frac{B}{D}\,\frac{B}{E}$, puis $\frac{B}{F}\,\frac{B}{G}\,\frac{B}{H}$ sont d'allures opposées que l'inspection de l'épure ou des chiffres permet de comparer aisément. En considérant les courbes (non tracées) passant par l'origine des courbes C D E d'une part, F G H d'autre part, on voit que, pour le bronze, il est indifférent, dans les limites des essais faits, d'opérer par coups répétés ou par coups progressifs. Nous signalerons encore qu'avec le marteau de 11^{kg}, chutes de 1^{m}, l'éprouvette était sensiblement plus épaisse en diamètre aux bases qu'au milieu *(fig. 37)*, l'action du marteau étant ainsi davantage localisée; tandis que, pour toutes les autres, le diamètre était renflé au milieu

(fig. 38). L'action du poids de 11^{kg} à 1^{m} est voisine de celle produisant le diamètre constant, si toutefois, dans de tels essais, on puisse réaliser cette condition.

Comme l'essai à la presse, c'est-à-dire à faible vitesse, accuse dès le début de la compression le renflement prépondérant au milieu, il s'ensuit que l'action précitée doit être attribuée à l'influence de la vitesse (trop petite) dans une certaine mesure,

Fig 38
Eprouvette à la fin de l'essai avec le marteau de 11 Kg Chutes de 4.00

Fig 37
Eprouvette à la fin de l'essai avec le marteau de 1 Kg Chutes de 1.00



et aussi à l'insuffisance du poids, c'est-à-dire à la puissance vive du choc qui, trop faible, donne un effet de contact plus prononcé qu'ailleurs; mais, dès qu'avec le même poids et une vitesse plus grande, on détermine une puissance vive plus élevée, la déformation s'accuse comme avec la presse; elle est prépondérante au milieu. Cette action a également lieu pour le plomb (1), un marteau de faible masse donne à une éprouvette cylindrique un plus grand diamètre à la base martelée qu'à la partie médiane, alors qu'on obtient le contraire avec une énergie moins rapide et même plus faible que celle employée dans le premier cas.

On peut déjà constater que dans les phénomènes de chocs les lois de déformation peuvent être semblables et présenter la plus grande analogie avec celles d'une pression lente.

(1) Dans le laminage on constate des effets analogues, soit que la pression est insuffisante, soit que les épaisseurs sont fortes.

Essais de compression et de chocs répétés sur du fer.

Tableau n° 17 *A*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	COMPRESSION			
	HAUTEURS SUCCESSIVES	RÉDUCTIONS	PRESSIONS	ÉNERGIE CALCULÉE
Éprouvettes cylindriques de fer : Hauteur = 20mm. Diamètre = 20mm. Durée de l'essai : 35 minutes.	20	»	»	»
	19,5	0,5	8.300	1,85
	19	1	11.800	5,6
	18	2	17.200	19,5
	17	3	20.600	39,8
	18	4	23.000	62
	15	5	25.200	85,4
	14	6	27.500	112,6
	13	7	30.200	142
	12	8	33.800	174
	11	9	37.400	208
	10	10	40.800	254
	9	11	45.600	298
	8,5	11,5	50.000	340

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Marteau de 11kg				
	Hauteurs successives	Réductions	Énergie du marteau T_m	Énergie de la presse T_p	Rapports $\frac{T_p}{T_m}$
	CHUTES DE 1m				
Éprouvettes cylindriques de fer : Hauteur = 20mm. Diamètre = 20mm. Poids de l'enclume : 140kg.	20	»	»	»	»
	19,8	0,2	11	0,4	0,036
	19,6	0,4	22	1,4	0,063
	19,4	0,6	33	2,4	0,0727
	19,2	0,8	44	4,4	0,1
	19	1	55	5,6	0,102
	18,8	1,2	66	7	0,106
	18,6	1,4	77	9	0,117
	18,4	1,6	88	11,5	0,13
	18,2	1,8	99	14	0,141
	18,1	1,9	101	17	0,167
	18	2	112	19,5	0,174
	17,8	2,2	121	22	0,182
	17,7	2,3	132	25	0,189

Essais de compression et de chocs répétés sur du fer.

Tableau n° 17 *B*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Marteau de 11kg				
	Hauteurs successives	Réductions	Énergie du marteau T_m	Énergie de la presse T_p	Rapport $\frac{T_p}{T_m}$
(Suite)	17,5	2,5	143	28	0,195
Éprouvettes cylindriques de fer :	17,3	2,7	154	32	0,207
Hauteur = 20mm.	17,1	2,9	165	36	0,217
Diamètre = 20mm.	16,9	3,1	176	41	0,233
Poids de l'enclume : 140kg.	16,1	3,3	187	45	0,241
	16,4	3,4	198	49	0,245
	16,5	3,5	209	53,5	0,256
	16,3	3,7	220	57	0,257
	16,7	3,9	231	59,5	0,257
	16	4	242	62	0,257
	15,8	4,2	253	64,5	0,255
	15,7	4,3	264	67	0,254
	15,6	4,4	275	69	0,254
	15,5	4,5	286	73	0,256
	15,3	4,7	297	77	0,260
	15,2	4,8	308	81	0,263
	15,1	4,9	319	83	0,261
	15	5	330	85,4	0,260
	14,9	5,1	341	86,5	0,254
	14,8	5,2	352	88	0,250
	CHUTES DE 4m				
	20	»	»	»	»
	18,8	1,2	44	7	0,159
	17,8	2,2	88	22	0,249
	17,1	2,9	132	36	0,273
	16,3	3,7	176	55	0,310
	15,6	4,4	220	69	0,314
	14,8	5,2	264	88	0,363
	14,3	5,7	308	106	0,334
	13,8	6,2	352	114	0,323
	13,5	6,5	396	126	0,318
	13,2	6,8	440	138	0,314
	12,9	7,1	484	144	0,298
	12,5	7,5	528	158	0,298
	12,2	7,8	572	170	0,297

Essais de compression et de chocs répétés sur du fer.

Tableau n° 17 *C.*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Hauteurs successives	Réductions	T_m	T_p	$\frac{T_m}{T_p}$
	Marteau de 11^{kg}				
	CHUTES DE 8^{m}				
Éprouvettes cylindriques de fer. Hauteur = 20^{mm}. Diamètre = 20^{mm}. Poids de l'enclume : 140^{kg}.	20	»	»	»	»
	17,5	2,5	88	28	0,318
	16	4	176	62	0,352
	14,3	5,7	264	106	0,400
	13	7	352	142	0,404
	12	8	440	176	0,400
	11,1	8,9	528	208	0,395
	Marteau de 30^{kg}				
	CHUTES DE 1^{m}				
	20	»	»	»	»
	19,3	0,7	30	3,4	0,116
	18,7	1,3	60	8	0,133
	18,2	1,8	90	14	0,156
	17,6	2,4	120	26	0,217
	17	3	150	39,8	0,265
	16,5	3,5	180	53,5	0,297
	15,9	4,1	210	63	0,30
	15,4	4,6	240	75	0,313
	15	5	270	85,4	0,317
	14,6	5,4	300	97	0,324
	14,2	5,8	330	108	0,327
	13,8	6,2	360	116	0,324
	13,4	6,6	390	128	0,327
	13,1	6,9	420	140	0,333
	12,8	7,2	450	145	0,323
	12,6	7,4	480	150	0,313
	12,3	7,7	510	162	0,317
	12,4	7,9	540	170	0,315
	11,8	8,2	570	174	0,306
	11,6	8,4	600	186	0,310
	11,4	8,6	630	194	0,308
	11,2	8,8	660	205	0,311
	11	9	690	208	0,303
	10,8	9,2	720	214	0,298
	10,6	9,4	750	226	0,302

Essais de compression et de chocs répétés sur du fer.

Tableau n° 17 *D.*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Marteau de 30kg				
	Hauteurs successives	Réductions	T_m	T_p	$\frac{T_p}{T_m}$
	CHUTES DE 1m				
Éprouvettes cylindriques de fer :	20	»	»	»	»
Hauteur = 20mm.	16,7	3,3	120	45	0,375
Diamètre = 20mm.	14,6	5,4	240	97	0,405
Poids de l'enclume : 140kg.	12,6	7,4	360	150	0,417
	11,2	8,8	480	205	0,42
	9,7	10,3	600	260	0,434
	8,5	11,5	720	340	0,474
	CHUTES DE 8m				
	20	»	»	»	»
	14	6	240	112,6	0,47
	10,5	9,5	480	230	0,48
	7,5	12,5	720	»	»

ESSAIS DE CHOCS RÉPÉTÉS SUR DU FER

Les essais sur des éprouvettes cylindriques de fer sont consignés dans le tableau n° 17 et sont rapportés sur l'épure *(fig. 2, pl. V)*. Sous l'action de la presse, l'effort maximum étant de 50.000kg, l'éprouvette de 20mm de hauteur a été réduite à 8mm,5, présentant sur son pourtour de nombreuses fentes, déchirures assez régulières ne s'étendant pas visiblement sur les faces planes d'appui *(fig. 39)*.

Sous les chocs du marteau de 11kg avec chutes de 1m, l'éprouvette prend la forme indiquée *figure 40*; les bases s'élargissent d'une façon assez prononcée; finalement, il se produit une ou plusieurs fentes qui obligent à interrompre l'essai.

Avec le marteau de 30kg, chutes de 1m, les déformations sont plus régulières que dans les divers autres cas. Les chocs

à 4^{m} donnent lieu à des déformations héliçoïdales et à des criques nombreuses *(fig. 41)*. Les chutes de 4^{m} et 8^{m} avec mouton de 11^{kg} accusent le renflement de l'éprouvette; le choc se fait dans de meilleures conditions qu'avec les chutes de 1^{m}.

En ce qui concerne le rendement, l'épure montre bien le désavantage du petit marteau à faible chute. La courbe C s'éloigne sensiblement des courbes D, E relatives aux chutes de 4^{m} et de 8^{m}. Ces courbes sont bien distinctes à partir

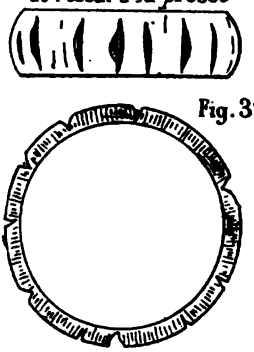


Fig. 39

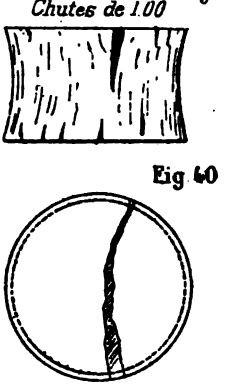


Fig 40

de leurs origines, tandis qu'avec le laiton elles étaient beaucoup plus voisines. Les courbes D et F montrent que le poids de 11^{kg} tombant de 4^{m} donne des résultats analogues au poids de 30^{kg} tombant de 1^{m}, mais que ce dernier présente plus d'avantages que l'autre vers la période d'aplatissement au delà de 7 à 8^{mm}.

C'est encore le marteau de plus grand poids qu'il convient de préférer; et, contrairement à ce qu'indiquent les essais du laiton, pour lesquels la vitesse à chute de 4^{m} était la plus avantageuse, pour le fer ce sont les chutes de 8^{m} qui accusent le meilleur rendement. C'est à la plus grande élasticité du fer qu'il faut sans doute attribuer ce fait.

Si on compare les épures relatives au laiton et au fer, il est curieux de remarquer qu'à la compression, les éprouvettes ont donné très sensiblement le même résultat; le laiton a exigé des efforts légèrement supérieurs. Au contraire, les essais aux chocs répétés font ressortir une résistance sensiblement plus élevée pour le fer que pour le laiton; toutes les valeurs relatives au fer sont supérieures à celles relatives au laiton. Les courbes montrent, ainsi que les rapports $\frac{T_p}{T_m}$, que les différences sont grandes, ce qui ne saurait encore s'expliquer que par la plus grande élasticité du fer, métal forgé plus énergiquement que le laiton.

Eprouvette à la fin de l'essai avec le marteau de 30 Kg. Chutes de 4.00

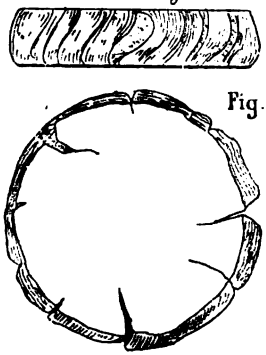


Fig. 41

Si, pour le laiton, le rapport $\frac{T_p}{T_m}$ a pu s'élever à 0,756; pour le fer ce rapport n'a pas atteint 0,50, soit un rapport d'énergie entre le fer et le laiton de $\frac{\text{fer}}{\text{laiton}} = \frac{3}{2}$, c'est-à-dire qu'il faut environ une fois et demie plus d'énergie pour marteler le fer à froid que pour marteler le laiton.

Ces essais sur du fer montrent bien qu'il convient d'employer pour les métaux élastiques, résistants, tenaces, des marteaux de masse suffisante, de grande vitesse, c'est-à-dire de grande énergie. Ce sont de tels marteaux que l'on est obligé d'employer pour le travail des grosses pièces d'acier.

On conçoit, d'ailleurs, qu'un petit marteau frappant indéfiniment sur un ressort, sans dépasser sa limite d'élasticité, ne produit pas de déformation; tandis que, frappant sur une pièce de matière molle, il produit son effet.

Dans le martelage, il convient donc de ne pas préciser de règles générales, attendu que les métaux forgés peuvent présenter toute une gamme au point de vue de l'élasticité ou de la malléabilité, suivant la température de travail et la nature du métal.

Remarquons encore que les courbes $(C_1, D_1, E_1,)(F_1, G_1, H_1)$, passant par les origines des courbes (C, D, E) (F, G, H), se trouvent en dessous de ces dernières et que, par suite, elles indiquent qu'il est plus avantageux d'opérer sur du fer à froid, soit par coups à énergie progressive, soit, mieux, par des coups peu nombreux de grande énergie, que par des coups répétés.

ESSAIS COMPARATIFS DE COMPRESSION ET DE CHOCS RÉPÉTÉS SUR DES ÉPROUVETTES CYLINDRIQUES DE CUIVRE

(Tableau n° 18. Épure fig. 8, pl. V.)

Le cuivre, métal très ductile, très malléable et quelque peu élastique, donne des résultats très réguliers à la compression et au choc.

A cause de l'élasticité du métal, c'est le petit marteau de 11^{kg} à chutes de 1^m qui est le moins favorable.

Les trois courbes F, G, H du marteau de 30^{kg} sont assez voisines et sont les plus avantageuses; les rapports $\frac{T_p}{T_m}$ ont une valeur moyenne de 0,55 accusant ainsi un rendement relatif assez élevé. Les courbes $\frac{B}{G}$ et $\frac{B}{F}$ montrent bien qu'il convient d'opérer sur le métal élastique au moyen de coups énergiques de préférence à de faibles coups.

On pourrait donc indifféremment adopter, pour le cuivre à froid, un marteau assez fort avec des vitesses assez variables sans que le rendement s'écarte beaucoup.

Sur du cuivre à haute température, la malléabilité étant grande, le marteau à faible vitesse reprendrait l'avantage.

ESSAIS COMPARATIFS DE COMPRESSION ET DE CHOCS RÉPÉTÉS SUR DES ÉPROUVETTES CYLINDRIQUES DE PLOMB

(Tableau N° 19. Épure fig. 4, pl. V.)

Afin de pouvoir comparer les divers essais précédents faits sur des éprouvettes de 20^{mm} de hauteur et de 20^{mm} de diamètre, avec les divers métaux indiqués, nous les avons également faits avec du plomb.

Nous avons obtenu des résultats analogues à ceux faits sur des éprouvettes cylindriques plus grosses.

L'avantage reste pour le métal malléable au plus petit marteau de 11^{kg} avec la plus petite chute de 1^{m} (courbe C de l'épure), et la valeur moyenne du rapport des énergies $\frac{T_p}{T_m} = 0{,}30$.

La courbe I montre la variation des rapports $\frac{T_p}{T_m}$ relatifs au poids de 11^{kg}, chutes de 1^{m}.

La plus grande dépense d'énergie correspond au marteau de 30^{kg} avec chutes de 8^{m}.

L'épure montre que les courbes des marteaux de 11^{kg}, chutes de 4^{m}, et de 30^{kg}, chutes de 4^{m} également, sont assez voisines.

La courbe F du marteau de 30^{kg}, chutes de 1^{m}, donne également un rendement assez voisin du marteau de 11^{kg}, chutes de 1^{m}.

Remarquons encore que la courbe J des rapports $\frac{T_p}{T_m}$ relatifs au marteau de 30^{kg}, chutes de 1^{m}, remonte vers les réductions à partir de 16^{mm}, tandis que la courbe I des rapports $\frac{B}{C}$ du marteau de 11^{kg}, chutes de 1^{m}, s'abaisse; ce qui montrerait que le rendement est plus grand avec le gros marteau lorsque l'épaisseur est faible.

Notons de nouveau que, pour le plomb, les chocs répétés sont plus économiques que les chocs simples de plus grande énergie,

Essais comparatifs de compression et de chocs répétés sur des éprouvettes de cuivre.

Tableau n° 18 A.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	COMPRESSION		
	RÉDUCTIONS	PRESSIONS	ÉNERGIE CALCULÉE
		kg	kgm
Éprouvette cylindrique de cuivre. Hauteur = 20mm. Diamètre = 20mm. Section = 314mm².	0,5	4.600	1,2
	1	7.500	4,4
	2	10.600	13,6
	3	12.400	25,1
	4	14.200	38,4
	5	15.800	53,4
	6	17.300	69,9
	7	19.000	88
	8	21.000	108
	9	23.200	130
	10	26.500	155
	11	31.300	183,8
	12	37.300	217,8
	13	45.000	258,4

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Marteau de 11kg			
	RÉDUCTIONS	ÉNERGIE du marteau Tm	ÉNERGIE de la presse Tp	RAPPORTS $\frac{Tm}{Tp}$
		CHUTES DE 1m		
Éprouvette cylindrique de cuivre. Hauteur = 20mm. Diamètre = 20mm. Section = 314mm².	0,5	11	1,2	0,108
	0,9	22	4	0,182
	1,3	33	7	0,213
	1,7	44	9,5	0,215
	2	55	13,6	0,247
	2,4	66	18	0,273
	2,8	77	22	0,287
	3,3	88	31,5	0,338
	3,6	99	35	0,353
	3,8	110	38	0,345
	4,2	121	40	0,33
	4,5	132	46	0,348
	4,8	143	52	0,364
	5,1	154	54	0,35
	5,4	165	60	0,364
	5,7	176	66	0,375
	6	187	69,9	0,373
	6,2	198	74	0,374

Essais comparatifs de compression et de chocs répétés sur des éprouvettes de cuivre.

Tableau n° 18 *B*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Marteau de 11kg — RÉDUCTIONS	ÉNERGIE du marteau Tm	ÉNERGIE de la presse Tp	RAPPORTS $\frac{Tm}{Tp}$
(Suite.) Éprouvette cylindrique de cuivre. Hauteur = 20mm. Diamètre = 20mm. Section = 314mm².	6,4	209	77	0,368
	6,7	220	82	0,374
	6,9	231	84	0,365
	7,1	242	88	0,365
	7,3	253	94	0,372
	7,5	264	98	0,372
	7,7	275	102	0,372
	CHUTES DE 4m			
	2	44	13,6	0,308
	3,4	88	30	0,34
	5	132	53,4	0,405
	6,2	176	74	0,42
	7,3	220	92	0,42
	8,2	264	112	0,42
	9	308	130	0,422
	9,5	352	144	0,41
	10,2	396	162	0,407
	10,8	440	180	0,408
	11,4	484	198	0,408
	11,8	528	214	0,405
	12,2	572	224	0,39
	CHUTES DE 8m			
	4,3	88	42	0,425
	6,7	176	82	0,467
	8,8	264	128	0,485
	10	352	155	0,442
	11,2	440	188	
	12,3	528	226	
	13,2	616		
	Marteau de 30kg CHUTES DE 1m			
	2	30	13,6	0,455
	3,5	60	32	0,532
	4,6	90	48	0,533
	5,8	120	68	0,568
	6,8	150	86	0,572
	7,8	180	106	0,58
	8,7	210	124	0,58

Essais comparatifs de compression et de chocs répétés sur des éprouvettes de cuivre.

Tableau n° 18 *C.*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Marteau de 30kg — RÉDUCTIONS	ÉNERGIE du marteau Tm	ÉNERGIE de la presse Tp	RAPPORTS Tm/Tp
(Suite) Éprouvette cylindrique de cuivre. Hauteur = 20mm. Diamètre = 20mm. Section = 314mm².	9,4	240	142	0,582
	10,1	270	160	0,592
	10,8	300	180	0,600
	11,4	330	200	0,605
	11,8	360	216	0,602
	12,3	390	226	0,60
	12,8	420	256	0,61
	13,2	450		
	13,6	480		
	14	510		
	14,3	540		
	14,5	570		
	14,7	600		
	CHUTES DE 4m			
	6	120	69,9	0,58
	9,8	240	151	0,64
	12	360	217,8	0,60
	13,8	480		
	14,9	600		
	CHUTES DE 8m			
	10	240	155	0,645
	13,9	480		
	16	720		

Observations.

Résistance à la compression ou charge par millimètre carré pour diverses réductions : $R = \frac{4600}{314} = 14^{kg}$.

Charge par millimètre carré de section moyenne : $R = \frac{15.800}{418} = 37^{kg}$.

Charge par millimètre carré de section moyenne : $R = \frac{26.500}{628} = 42^{kg}$.

Charge par millimètre carré : $R = \frac{45.000}{897} = 50^{kg}$.

Essais comparatifs de compression et de chocs répétés sur du plomb.

Tableau n° 19 *A*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	COMPRESSION — RÉDUCTION de la HAUTEUR	COMPRESSION — PRESSIONS	COMPRESSION — ÉNERGIE CALCULÉE
	mm.		kgm.
Éprouvettes de plomb cylindriques. Hauteur = 20mm. Diamètre = 20mm. Section = 314mm².	0,5	100	0,025
	1	260	0,13
	2	380	0,4
	3	440	0,7
	4	480	1
	5	490	1,5
	6	520	2
	7	550	2,6
	8	600	3,2
	9	700	3,9
	10	840	4,7
	11	940	5,6
	12	1.300	6,7
	13	1.600	8,1
	14	2.300	10,2
	15	3.400	13
	16	4.900	17,1
	17	9.600	23,8
	17,5	19.200	
	18	36.000	46,8
	18,5	48.000	67,3

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	RÉDUCTIONS	ÉNERGIE DU MARTEAU	ÉNERGIE DE LA PRESSE	RAPPORT $\frac{Tp}{Tm}$
Éprouvettes de plomb cylindriques.	Marteau de 11kg CHUTES DE 1m			
Hauteur : 20mm	7	11	2,6	0,257
Diamètre: 20mm	12	22	6,7	0,305
Section: 314mm²	14,5	33	11,8	0,357
	15,5	44	15	0,342
	16	55	17,1	0,31

Essais comparatifs de compression et de chocs répétés sur du plomb.

Tableau n° 19 *B.*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	RÉDUCTIONS	ÉNERGIE DU MARTEAU	ÉNERGIE DE LA PRESSE	RAPPORT $\frac{Tp}{Tm}$
		Marteau de 11^{kg}		
		HAUTEUR DE CHUTES = 4^{m}		
Éprouvettes de plomb cylindriques	13,5	44	9	0,205
Hauteur : 20^{mm}	16,2	88	19	0,216
Diamètre: 20^{mm}	17,4	132	32	0,242
Section : 314^{mm2}		HAUTEUR DE CHUTES = 8^{m}		
	15,5	88	15	0,17
	18	176	46,8	0,266
		Marteau de 30^{kg}		
		HAUTEUR DE CHUTES = 1^{m}		
	12	30	6,7	0,224
	15,5	60	15	0,25
	16,7	90	22,5	0,25
	17,5	120	35	0,28
	18,1	150	48	0,32
	18,5	180	67,3	0,375
		HAUTEUR DE CHUTES = 4^{m}		
	17	120	23,8	0,198
	18,7	240	80	0,335
		HAUTEUR DE CHUTES = 8^{m}		
	18,5	240	67,3	0,281
	19,2	480	»	»

Observations.

Charges de compression pour diverses réductions de hauteur.

Charge par millimètre carré de section $R = \frac{100^{kg}}{314} = 0^{kg},32$

Charge par millimètre carré de section $R = \frac{260}{3,14} = 0^{kg},82$

Charge par millimètre carré de section moyenne fictive $R = \frac{190}{418} = 1^{kg},17$

Charge par millimètre carré de section moyenne fictive $R = \frac{840}{628} = 1^{kg},3$

Charge par millimètre carré de section moyenne fictive $R = \frac{3.400}{1.256} = 2^{kg},7$

Charge par millimètre carré de section moyenne fictive $R = \frac{48.000}{4.200} = 11^{kg}$

les courbes passant par les origines des courbes des chocs répétés se trouvant au-dessus de ces dernières.

Nous avons indiqué sur cette épure la variation des charges par millimètre carré de section moyenne fictive à une échelle d'ordonnées assez grande. L'allure de cette courbe a beaucoup d'analogie avec celle des pressions totales.

Pour faciliter la comparaison entre le pouvoir des deux marteaux de 30^{kg} tombant de 8^{m}, et de 11^{kg} tombant de 1^{m} et travaillant à chocs répétés de 240^{kgm} et 11^{kgm}, nous avons rapporté *(fig. 5, pl. V)* les courbes d'énergie de ces marteaux pour les divers métaux considérés dans les essais précédents avec les éprouvettes de 20^{mm} de hauteur et de 20^{mm} de diamètre. On voit que les courbes pour le fer, le laiton, le cuivre ont même allure, et qu'il suffirait de prolonger ces courbes, soit vers l'origine, soit vers l'asymptote, pour apprécier les différences d'énergie.

On voit que le fer martelé avec le marteau à énergie de 240^{kgm} est réduit dans les mêmes conditions que le laiton avec le marteau à énergie de 11^{kgm} ; que le laiton et le cuivre s'éloignent peu de ces conditions.

Il faut particulièrement remarquer le grand éloignement des courbes du plomb des autres, ce qui montre toute l'influence de l'état malléable, et combien il est important pour la facilité et la rapidité du travail, d'opérer à haute température sur les métaux résistants; à température déterminant une malléabilité à faible résistance analogue à celle du plomb, ou intermédiaire entre le plomb et le cuivre.

ESSAIS COMPARATIFS DE COMPRESSION ET DE CHOCS A ÉNERGIE PROGRESSIVE SUR DES ÉPROUVETTES TUBULAIRES EN PLOMB DE 40^{mm} DE HAUTEUR.

(Tableau n° 20. Épure fig. 1, pl. VI).

Dans ces essais, les marteaux de 4, 12 et 29^{kg} sont tombés successivement de hauteurs variables sur des éprouvettes identiques, chaque coup exerçant son action sur une éprouvette intacte.

Ces essais exigent ainsi un grand nombre d'éprouvettes, ce qui nous a conduit à choisir la forme tubulaire. Ces éprouvettes ont été sciées dans un tube de plomb, puis les faces d'about ont été rectifiées au tour, la longueur ne variant guère que de quelques dixièmes de millimètre. La forme tubulaire permet aussi d'obtenir de fortes réductions.

Le tableau n° 20 donne les éléments de l'essai de compression exécuté en 12 minutes, c'est-à-dire à une vitesse permettant de mesurer bien exactement les raccourcissements et les efforts.

L'épure *(fig. 1, pl. VI)* indique que les courbes d'énergie des marteaux présentent une certaine ondulation qui s'explique par la formation des bourrelets donnant lieu à une flexion de la paroi de dedans en dehors, en même temps que l'aplatissement se produit.

Ces courbes tendent évidemment vers l'ordonnée d'abscisse 40^{mm} qui est asymptote.

Les essais montrent le désavantage du petit marteau de 4^{kg} par rapport aux marteaux de 12 et de 29^{kg}, particulièrement vers la réduction de 12^{mm} pour laquelle se produit déjà une flexion latérale assez prononcée.

Les rapports $\frac{T_p}{T_m}$, dont la variation est représentée par la courbe F pour le marteau de 4^{kg}, décroissent sensiblement; le rendement du choc par rapport à la presse se réduit donc avec la hauteur de chute, c'est-à-dire avec la vitesse.

Avec les marteaux de 12 et de 29^{kg} les variations de ces rapports représentées par les courbes G et H décroissent également dans les premières réductions correspondant aux faibles vitesses, puis deviennent sensiblement constantes aux grandes chutes.

On voit que le marteau de 12^{kg} est le plus avantageux pour les réductions jusqu'à 30^{mm}, puis le marteau de 29^{kg} reprend l'avantage. La valeur moyenne de ces rapports est voisine de 0,25, de sorte que le martelage exige environ quatre fois plus

Essais comparatifs de compression, de chocs à énergie progressive et de chocs répétés à énergie constante sur des éprouvettes tubulaires en plomb.

Tableau n° 20 A.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	ESSAI DE COMPRESSION		
	RÉDUCTIONS	PRESSIONS	ÉNERGIE Tp
Eprouvettes tubulaires de plomb Hauteur = 40mm Diamètre extérieur = 40mm. Diamètre intérieur = 30mm. La durée de l'essai de compression a été de 12 minutes.	0,5	190	
	1	430	
	2	520	0,8
	3	590	
	4	620	1,9
	5	680	
	6	710	2,8
	7	780	
	8	850	3,2
	9	630	
	10	620	4
	11	610	
	12	605	
	13	600	
	14	590	6
	15	580	
	16	570	
	17	550	
	18	540	8
	19	545	
	20	550	8,4
	21	540	
	22	530	
	23	530	
	24	540	11
	25	550	11,4
	26	560	12,2
	27	570	13
	28	850	14,2
	29	1.900	15,9
	30	3.100	18
	31	3.800	21
	32	4.900	24,5
	33	9.500	29
	34	9 100	38
	35	16.200	51

Essais comparatifs de compression, de chocs à énergie progressive et de chocs répétés à énergie constante sur des éprouvettes tubulaires en plomb.

Tableau n° 20 *B*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Chocs progressifs				
	MARTEAU DE 4ᵏᵍ				
	Hauteur de chute	Recouvrements	Énergie Tm	Énergie Tp	Rapports $\frac{Tp}{Tm}$
Éprouvettes tubulaires de plomb.	0,50	1,7	2	0,7	0,35
Hauteur = 40ᵐᵐ	1	2,6	4	1,2	0,30
Diamètre extérieur = 40ᵐᵐ	2	5,2	8	2,3	0,287
Diamètre intérieur = 30ᵐᵐ	3	7	12	3	0,25
	4	8,7	16	3,8	0,238
	5	10	20	4	0,200
	6	11,2	24	4,2	0,175
	7	12,1	28	4,5	0,16
	8	13,2	32	5,1	0,159
	MARTEAU DE 12ᵏᵍ				
	0,50	4,6	6	2,00	0,33
	1	8,2	12	3,6	0,30
	2	13,8	24	5,8	0,243
	3	21,3	36	9	0,250
	4	25,4	48	11,8	0,246
	5	27,6	60	13,4	0,224
	6	29,2	72	16,5	0,230
	7	30,4	84	19,4	0,230
	8	31,4	96	23	0,240
	MARTEAU DE 29ᵏᵍ				
	0,50	8,5	14,5	3,7	0,256
	1	14,1	29	6,2	0,214
	2	24	58	11	0,19
	3	30,5	87	20	0,330
	4	37,5	116	25	0,214
	5	33,5	145	34	0,234
	6	34,1	174	40	0,230
	7	34,7	203	47	0,230
	8	35	232	51	0,221

Essais comparatifs de compression, de chocs à énergie progressive et de chocs répétés à énergie constante sur des éprouvettes tubulaires en plomb.

Tableau n° 20 *C.*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Chocs répétés — Marteau de 4kg : HAUTEUR DE CHUTE 1m			
	RACCOURCISSEMENTS	ÉNERGIE Tm	ÉNERGIE Tp	RAPPORTS $\frac{Tp}{Tm}$
Éprouvettes tubulaires de plomb. Hauteur = 40mm Diamètre extérieur = 40 mm Diamètre intérieur = 30mm	2,6	4	1,2	0,30
	6,8	8	2,8	0,35
	10,5	12	4,1	0,334
	14,2	16	6	0,375
	18,2	20		
	22,8	24	9,8	0,41
	26,2	28		
	29	32	15,9	0,498
	30,3	36		
	31	40	21	0,526
	31,6	44		
	32	48	24,5	0,505
	32,3	52		
	32,6	56		
	33	60	29	0,485
	33,3	64	33,8	0,528
	33,6	68	34,4	0,503
	33,8	72		
	34	76	38	0,50
	34,2	80		
	34,5	84	44	0,524
	34,7	88		
	34,8	92		
	34,9	96	49	0,505
	35	100	51	0,510
	35,1	104		
	35,2	108		
	35,3	112		
	35,35	116		
	35,4	120		
	35,45	124		
	35,5	128		
	35,55	132		
	36	136		
	36,05	140		

Essais comparatifs de compression, de chocs à énergie progressive et de chocs répétés à énergie constante sur des éprouvettes tubulaires en plomb.

Tableau n° 20 *D.*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Chocs répétés — Marteau de 4ᵏᵍ : HAUTEUR DE CHUTE : 1ᵐ — RACCOURCISSEMENTS	ÉNERGIE Tm	ÉNERGIE Tp	RAPPORTS $\frac{Tp}{Tm}$
Éprouvettes tubulaires de plomb.	5,2	8	2,3	0,287
	10,5	16		
Hauteur = 40ᵐᵐ.	17	24	7,9	0,33
	23,2	32	10	0,314
Diamètre extérieur = 40ᵐᵐ.	28,5	40		
	30,1	48	18,5	0,385
Diamètre intérieur = 30ᵐᵐ.	31,2	56		
	32	64	24,5	0,382
	32,5	72	26	0,36
	32,9	80		
	33,3	88	33,8	0,385
	33,8	96		
	34,1	104	40	0,385
	34,3	112		
	34,5	120	44	0,367
	34,8	128		
	35	136	51	0,375
	35,2	144		
	35,3	152		
	35,5	160		
	35,65	168		
	35,7	176		
	36	184		
	Marteau de 12ᵏᵍ : HAUTEUR DE CHUTE : 2ᵐ			
	13,8	24	5,8	0,243
	27,9	48	14,1	0,293
	31,9	72		
	33,5	96	34	0,353
	34,2	120	41	0,342
	34,9	144	49	0,341
	35,4	168		
	36	192		
	36,4	216		
	36,8	240		

Essais comparatifs de compression, de chocs à énergie progressive et de chocs répétés à énergie constante sur des éprouvettes tubulaires en plomb.

Tableau n° 20 *E*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Chocs répétés — Marteau de 4ᵏᵍ : HAUTEUR DE CHUTE 1ᵐ			
	RACCOURCISSEMENTS	ÉNERGIE Tm	ÉNERGIE Tp	RAPPORTS $\frac{Tp}{Tm}$
Éprouvettes tubulaires de plomb.	24	58	11	0,19
Hauteur = 40ᵐᵐ.	32,3	116	27	0,233
Diamètre extérieur = 40ᵐᵐ	34,5	174	44	0,253
	35	232	51	0,221
Diamètre extérieur = 30ᵐᵐ.	36	290		
	36,5	348		

Observations.

Les déformations des éprouvettes sont très intéressantes et montrent qu'elles se reproduisent à peu près d'une façon identique, soit que l'on opère à la presse, soit que l'aplatissement ait lieu par le choc à petite ou à grande vitesse.

Cependant la régularité est plus assurée par la presse et par les coups répétés ; ces derniers permettant de changer la position relative de l'éprouvette et du marteau à chaque coup.

La planche VI nous montre quelques spécimens de déformations.

d'énergie que la presse pour aplatir les tubes de plomb considérés.

La supériorité du marteau de 12^{kg} sur le marteau de 29^{kg} dans la première partie de la réduction doit, sans doute, être attribuée au rapport des masses des marteaux et de l'enclume, plus grand pour le marteau de 29^{k} que pour le marteau de 12^{k}.

ESSAIS COMPARATIFS DE COMPRESSION, DE CHOCS A ÉNERGIE PROGRESSIVE ET DE CHOCS RÉPÉTÉS D'ÉNERGIE CONSTANTE

Afin de comparer les effets des chocs à énergie progressive avec ceux des chocs répétés d'énergie constante, nous avons martelé des éprouvettes tubulaires de plomb identiques aux précédentes et le tableau n° 20 ainsi que l'épure *(fig. 1, pl. VI)* indiquent les résultats trouvés. La courbe I se rapportant au marteau de 4^{kg} tombant de 1^{m} de hauteur, montre que ce petit marteau à faible vitesse possède un grand avantage sur les autres; le rendement avec la presse atteint $0{,}50 = \frac{T_p}{T_m}$.

Cet avantage concorde bien avec les résultats trouvés en opérant sur des éprouvettes cylindriques pleines en plomb.

L'avantage est particulièrement prépondérant par rapport au même marteau opérant par coups progressifs courbe C.

Il convient donc de marteler les métaux très malléables avec des marteaux à petite vitesse, le rapport de la masse de l'enclume à la masse du marteau étant très grand et en martelant par coups répétés.

Si on examine les courbes I et J, cette dernière représentant les coups avec le marteau de 4^{kg} et de hauteur de chute de 2^{m}, soit un rapport de vitesse $\frac{I}{J} = \frac{V}{V'} = \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{H'}} = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{1{,}414}$, on peut juger de l'influence de la vitesse; les énergies dépensées sont sensiblement proportionnelles aux vitesses :

Ainsi pour une même réduction de 15^{mm}, on a $\frac{17^{kgm}}{22^{kgm}}$; pour 30^{mm} on a $\frac{34^{kgm}}{46^{kgm}}$; pour 35^{mm} on trouve $\frac{100^{kgm}}{142^{kgm}}$; l'effet utile serait donc à très peu près inversement proportionnel à la vitesse.

Si on compare la courbe J (poids de 4^{kg}, hauteur de chute 2^{m}) avec la courbe K (poids de 12^{kg}, hauteur de chute de 2^{m} également), on voit que le rapport des ordonnées de J sur les ordonnées de K, pour une même réduction, est plus grand que le rapport des ordonnées de I sur les ordonnées de J, ce qui montre que l'influence de la masse de l'enclume a beaucoup moins de prépondérance que la variation de la vitesse.

Ainsi, à une réduction de 25^{mm} le rapport des ordonnées $\frac{J}{K}$ donne $\frac{34^{kgm}}{40^{kgm}}$, tandis que le rapport des poids ou des masses est $\frac{4}{12} = \frac{1}{3}$.

Il est donc préférable d'augmenter la masse du marteau pour une même masse de chabotte, que d'augmenter la vitesse d'un marteau de masse plus faible.

C'est la règle suivie ordinairement pour les gros pilons dont on augmente toujours les masses sans augmenter parallèlement les vitesses, lorsqu'il s'agit, et c'est le cas des gros pilons, de marteler des métaux malléables, des métaux mous présentant peu d'élasticité.

Si on compare la courbe L (poids de 29^{kg}, hauteur de chute $= 2^{m}$) avec la courbe K et la courbe J des poids de 12^{kg} et 4^{kg} tombant de 2^{m} aussi, on voit que les différences s'accusent davantage et font bien ressortir l'importance du rapport des masses, l'influence d'une forte masse d'enclume par rapport à celle du marteau.

On remarque que la courbe L des chocs répétés présente une anomalie; elle se trouve au-dessus de la courbe E dans les premières réductions, puis la courbe L coupe la courbe E, montrant que les coups répétés reprennent l'avantage.

ESSAIS COMPARATIFS DE COMPRESSION ET DE CHOCS A ÉNERGIE PROGRESSIVE SUR DES ÉPROUVETTES TUBULAIRES EN PLOMB DE 20mm DE HAUTEUR.

(Tableau 21. Epure fig. 2, pl. VI.)

Des essais analogues aux précédents faits sur des éprouvettes tubulaires de 20mm de hauteur ont donné les résultats consignés dans le tableau n° 21. La hauteur étant faible, la flexion latérale de la paroi prend une moindre importance que dans le cas précédent d'éprouvettes de 40mm de hauteur.

Les courbes C, D, E sont plus régulières et s'éloignent peu l'une de l'autre; l'avantage reste encore à la courbe E du gros marteau de 29kg, dont le rapport de l'énergie avec celle de la presse est encore moyennement égal à 0,25, tandis que les autres marteaux accusent des rapports un peu inférieurs.

On voit que dans les limites des hauteurs d'éprouvettes 40mm et 20mm, le rendement du marteau par rapport à la presse varie peu.

Les courbes F, G, H des rapports d'énergie $\frac{T_p}{T_m}$ accusent un minimum voisin de la réduction de 10mm, moitié de la hauteur de l'éprouvette.

ESSAIS COMPARATIFS DE COMPRESSION, DE CHOCS A ÉNERGIE PROGRESSIVE ET DE CHOCS RÉPÉTÉS D'ÉNERGIE CONSTANTE

(Tableau n° 21. Épure fig. 2, pl. VI.)

Les éprouvettes de 20mm de hauteur soumises à des chocs répétés ont donné des résultats similaires à ceux trouvés pour la hauteur 40mm. C'est toujours le petit marteau de 4kg et de chutes de 1m qui a la priorité, qui exige le moins d'énergie et donne des déformations bien régulières.

Cependant le marteau de 12kg, chutes de 1m, présente sensi-

Essais comparatifs de compression, de chocs à énergie progressive et de chocs répétés sur des éprouvettes tubulaires en plomb.

Tableau n° 21 *A*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	ÉLÉMENTS DE COMPRESSION		
	RÉDUCTIONS	PRESSIONS	ÉNERGIE
Éprouvettes tubulaires de plomb Hauteur = 20mm Diamètre extérieur = 40mm Diamètre intérieur = 30mm	1	530	0,3
	2	700	0,8
	3	750	1
	4	770	1,2
	5	780	1,5
	6	790	1,9
	7	820	2,1
	8	850	2,6
	9	960	3,6
	10	1.200	4,1
	11	1.560	5
	12	2.200	6,8
	13	2.550	9,4
	14	3.500	12,2
	15	5.600	16,4
	16	10.200	24,8
	16,5	16.500	32
	17	22.000	38,8
	17,5	30.500	52
	18	40.000	68
	18,3	45.000	82

Essais comparatifs de compression, de chocs à énergie progressive et de chocs répétés sur des éprouvettes tubulaires en plomb.

Tableau n° 21 *B*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	HAUTEUR de chute	RACCOURCISSEMENTS	ÉNERGIE Tm	ÉNERGIE Tp	RAPPORTS $\frac{Tp}{Tm}$
	MARTEAU DE 4ᵏᵍ				
Éprouvettes tubulaires de plomb	0,50	2	2	0,8	0,40
Hauteur = 20ᵐᵐ	1	2,8	4	0,9	0,225
Diamètre extérieur = 40ᵐᵐ	2	5,4	8	1,7	0,213
Diamètre intérieur = 30ᵐᵐ	3	6,7	12	2	0,167
	4	7,8	16	2,4	0,15
	5	8,5	20	3	0,15
	6	9,2	24	3,6	0,15
	7	10	28	4,1	0,147
	8	10,5	32	4,5	0,141
	MARTEAU DE 12ᵏᵍ				
	0,50	4,1	6	1,3	0,217
	1	6,8	12	2	0,167
	2	9,8	24	4	0,167
	3	11,9	36	6,6	0,183
	4	12,8	48	8,8	0,184
	5	14,2	60	13	0,217
	6	14,8	72	15,8	0,22
	7	15,4	84	18	0,215
	8	15,7	96	20,8	0,225
	MARTEAU DE 20ᵏᵍ				
	0,50	7,2	14,5	2,2	0,152
	1	10,9	29	4,8	0,166
	2	14,2	58	12,8	0,222
	3	15,8	87	21	0,242
	4	16,5	116	32	0,27
	5	16,9	145	36	0,258
	6	17,2	174	43	0,254
	7	17,5	203	52	0,255
	8	17,8	232	58	0,25

Essais comparatifs de compression, de chocs à énergie progressive et de chocs répétés sur des éprouvettes tubulaires en plomb.

Tableau n° 21 C.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Essais de chocs répétés			
	Poids de 4k		HAUTEUR DE CHUTE : 1m	
	RACCOURCISSEMENTS	ÉNERGIE T_m	ÉNERGIE T_p	RAPPORTS $\frac{T_p}{T_m}$
Éprouvettes tubulaires de plomb Hauteur = 30mm Diamètre extérieur = 40mm Diamètre intérieur = 30mm	2,8	4	0,9	0,225
	4,8	8	1,4	0,175
	7	12	2,1	0,175
	9	16	3,6	0,225
	10	20	4,1	0,205
	11,5	24	5,8	0,242
	12	28	6,8	0,243
	13	32	9,4	0,294
	13,5	36	10,5	0,293
	14	40	12,2	0,305
	14,5	44	14	0,318
	14,8	48	15,6	0,325
	15,2	52	17	0,326
	15,5	56	20	0,357
	15,7	60	20,8	0,349
	15,9	64		
	16	68	24,8	0,365
	16,1	72		
	16,4	76		
	16,5	80	29	0,364
	16,6	84		
	16,7	88		
	16,8	92		
	16,9	96	33	0,384
	17	100	38,8	0,388
	Poids de 4k		HAUTEUR DE CHUTE : 8m	
	10,5	32	4,5	0,14
	14	64	12,2	0,191
	15,5	96	20	0,209
	16,2	128	26	0,203
	16,8	160	34	0,213
	17,1	192	42	0,219

Essais comparatifs de compression, de chocs à énergie progressive et de chocs répétés sur des éprouvettes tubulaires en plomb.

Tableau n° 21 *D*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Essais de chocs répétés — Poids de 12kg — HAUTEUR DE CHUTE : 1m — RACCOURCISSEMENTS	ÉNERGIE Tm	ÉNERGIE Tp	RAPPORTS $\frac{Tp}{Tm}$
Éprouvettes tubulaires de plomb Hauteur = 20mm Diamètre extérieur = 40mm Diamètre intérieur = 30mm	6,8	12	2	0,167
	11	24	5	0,208
	13	36	9,4	0,262
	14,5	48	14	0,391
	15,7	60	20,8	0,35
	16,2	72	26	0,36
	16,4	84	29	0,345
	16,8	96	34	0,355
	17,2	108	43	0,400
	Poids de 29kg — HAUTEUR DE CHUTE : 1m			
	10,8	29	4,8	0,166
	14,5	58	14	0,212
	16,2	87	26	0,3
	16,8	116	34	0,294
	17,2	145	43	0,304

blement les mêmes avantages. Les deux courbes J et K se coupent en restant très voisines.

Le marteau lourd 29^{kg}, chutes de 1^{m}, moins avantageux que les précédents, est néanmoins plus économique que les autres battants à coups progressifs ou plutôt d'un seul coup, ainsi que l'indique la courbe L.

Afin de bien faire ressortir l'influence défavorable de la vitesse, nous avons battu avec le poids de 4^{kg} et une hauteur de chute de 8^{m}, courbe M, qui est extérieure à toutes les autres, mais serait néanmoins plus avantageuse que la courbe C, si le marteau avait pu battre au delà de 8^{m}, de manière que cette courbe C se serait étendue au-dessus de la courbe M.

ESSAIS COMPARATIFS DE COMPRESSION ET DE CHOCS RÉPÉTÉS SUR DES ÉPROUVETTES TUBULAIRES EN FER

(Tableau n° 22. Épure fig. 3, pl. VI.)

La compression continue d'un tube de fer de longueur suffisante (40^{mm} de longueur pour un diamètre de 30^{mm}) donne lieu à des efforts variables du fait de la formation de bourrelets déterminant des effets de flexion partielle.

La courbe A de l'épure *figure 3* montre, par ses ondulations, les variations qui correspondent à deux bourrelets donnés par l'éprouvette; puis l'aplatissement proprement dit ayant lieu, les pressions augmentent rapidement, comme dans le cas d'une pièce courte pleine.

La courbe B du travail mécanique est plus régulière, tout en accusant une faible ondulation.

Les chocs répétés avec le marteau de 11^{kg} et chutes de 1^{m}, 4^{m} et 8^{m} donnent les courbes C, D, E.

La courbe C s'écarte beaucoup des deux autres et confirme le désavantage, pour un métal élastique tel que le fer à froid, du petit marteau à faible énergie. Les rapports $\frac{T_p}{T_m} = \frac{B}{C}$ du

Essais comparatifs de compression et de chocs répétés sur des éprouvettes tubulaires en fer.

Tableau n° 22 *A*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	COMPRESSION A LA MACHINE			
	HAUTEURS SUCCESSIVES	RÉDUCTIONS	PRESSIONS	ÉNERGIE CALCULÉE
Tube de fer. Hauteur = 40mm. Diamètre extér. = 30mm. Diamètre intér. = 25mm.	40	»	»	»
	39,75	0,25	400	»
	39,50	0,5	900	0,5
	39	1	3.800	1,9
	38	2	7.900	8
	37	3	9.000	16,5
	36	4	9.800	26
	35	5	10.450	36,2
	34	6	10.700	47
	33	7	10.700	57,8
	32	8	10.500	68,4
	31	9	9.800	78,6
	30	10	9.000	88,1
	29	11	8.000	96,6
	28	12	7.000	104,1
	27	13	6.400	110,8
	26	14	6.550	117,1
	25	15	8.200	123,7
	24	16	8.500	131,3
	23	17	8.600	139,8
	22	18	8.650	148,5
	21	19	8.550	157,2
	20	20	8.100	165,5
	19	21	7.000	173,1
	18	22	7.100	180,3
	17	23	7.200	187,5
	16	24	8.000	195,2
	15	25	10.300	204,2
	14	26	12.000	215,2
	13	27	14.200	228,2
	12	28	19.400	244,7
	11	29	24.000	266,2

Essais comparatifs de compression et de chocs répétés sur des éprouvettes tubulaires en fer.

Tableau n° 22 *B*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Poids de 11kg — HAUTEUR DE CHUTE = 1m				
	Hauteurs successives	Réductions	Énergie du marteau Tm	Énergie de la presse Tp	Rapports $\frac{Tp}{Tm}$
Tube de fer.	40	»	»	»	»
Hauteur = 40mm.	39,6	0,5	11	0,5	0,045
	39	1	22	1,9	0,086
Diamètre extérieur = 30mm.	38,3	1,7	33	5,9	0,179
	37,7	2,3	44	10	0,224
Diamètre intérieur = 25mm.	37,2	2,8	55		
	36,7	3,3	66		
	36,2	3,8	77	22	0,286
	35,7	4,3	88		
	35,2	4,8	99		
	34,6	5,4	110	40	0,365
	34,2	5,8	121		
	33,7	6,3	132		
	33,3	6,7	143		
	32,7	7,3	154		
	32,3	7,7	165		
	31,8	8,2	176		
	31,3	8,7	187		
	30,9	9,1	198	80	0,405
	30,4	9,6	209		
	30,1	9,9	220		
	29,6	10,4	231		
	29,2	10,8	242		
	28,7	11,3	253		
	28,3	11,7	264	98	0,372
	27,8	12,2	275		
	27,3	12,7	286		
	26,8	13,2	297		
	26,3	13,7	308		
	25,8	14,2	319		
	25,3	14,7	330		
	24,8	15,2	341		
	24,3	15,7	352		
	23,8	16,2	363		
	23,3	16,7	374		
	22,8	17,2	385	140	0,364
	22,3	17,7	396		
	21,7	18,3	407		
	21,3	18,7	418		
	20,8	19,2	429		

Essais comparatifs de compression et de chocs répétés sur des éprouvettes tubulaires en fer.

Tableau n° 22 *C*.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Poids de 11kg — HAUTEUR DE CHUTE = 1m — Hauteurs successives	Réductions	Énergie du marteau T_{mo}	Énergie de la presse T_p	Rapports $\frac{T_p}{T_{mo}}$
(Suite.)	20,4	19,6	440		
Tube de fer.	20	20	451	165,5	0,365
	19,6	20,4	462		
Hauteur = 40mm.	19,2	20,8	473		
	18,8	21,2	484		
Diamètre extérieur = 30mm.	18,4	21,6	495		
	18	22	506	180,3	0,357
Diamètre intérieur = 25mm.	17,7	22,3	517		
	17,3	22,7	528		
	16,9	23,1	539		
	16,5	23,5	550		
	16,2	23,8	561		
	15,8	24,2	572	198	0,345
	15,5	24,5	583		
	15,2	24,8	594		
	14,9	25,1	605	206	0,34
	14,6	25,4	616		
	14,3	25,7	627		
	14	26	638		
	13,7	26,3	649		
	13,3	26,7	660		
	13,1	26,9	671		
	12,8	27,2	682	232	0,339
	HAUTEUR DE CHUTE = 4m				
	40	»	»	»	»
	37	3	44	16,5	0,375
	34,5	5,5	88	39	0,445
	32,4	7,6	132	64	0,485
	29,7	10,3	176	91	0,518
	26,6	13,4	220	112	0,515
	HAUTEUR DE CHUTE = 8m				
	40	»	»	»	»
	34,6	5,4	88	40	0,455
	29,5	10,5	176	94	0,535
	22	18	264	148,5	0,565

Essais comparatifs de compression et de chocs répétés sur des éprouvettes tubulaires en fer.

Tableau n° 22 *D*

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Poids de 30kg — HAUTEUR DE CHUTE = 1m — RÉDUCTIONS	ÉNERGIE ¡Tm	ÉNERGIE Tp	RAPPORTS $\frac{Tp}{Tm}$
Tube de fer. Hauteur = 40mm. Diamètre extér. = 30mm. Diamètre intér. = 25mm.	1,7	30	4,8	0,16
	2,8	60	14	0,234
	4,4	90	28	0,312
	5,6	120	41	0,342
	6,7	150	53	0,352
	8,4	180	73	0,405
	10,1	210	89	0,423
	11,6	240	102	0,425
	13,5	270	117	0,434
	15,7	300	126	0,421
	18	330	148,5	0,451
	19,9	360	156	0,434
	22,4	390	183	0,468
	24,2	420	197	0,47
	25,2	450	207	0,46
	26,5	480	222	0,461
	27,5	510	236	0,462
	28,4	540	252	0,468
	29,1	570	270	0,474
	29,5	600	286	0,476
	HAUTEUR DE CHUTE = 8m			
	12	240	104	0,434
	23,5	438	192	0,400(*)
	29,5	720	286	0,397
	HAUTEUR DE CHUTE = 4m			
	7	120	57,8	0,48
	16	240	131,8	0,556
	26	360	215,2	0,697

(*) La température des éprouvettes sous l'effet du choc était telle qu'on ne pouvait les tenir en main.

marteau de 11^{kg} tombant de 1^{m} donnent une courbe à ordonnées croissantes pour les premières réductions, puis un maximum a lieu vers la réduction 10^{mm}, ensuite les ordonnées décroissent avec une valeur moyenne égale à 0,35.

Le rendement, très faible pour les premiers coups, alors que l'élasticité a sa plus grande valeur, montre tout l'avantage de la presse pendant cette période.

Moyennement, ce petit marteau exige trois à quatre fois plus d'énergie que la presse.

Il est très curieux que les courbes D, E soient si voisines l'une de l'autre, et aussi de la courbe D′, la plus avantageuse, correspondant au poids de 30^{kg} avec chutes de 4^{m}.

Il est non moins curieux de constater que le marteau de 30^{kg}, chutes de 1^{m}, est préférable au marteau de 30^{kg}, chutes de 8^{m}.

Remarquons aussi que les six courbes sont très voisines dans les premières réductions, puis s'écartent beaucoup dans les réductions au delà de 8^{mm}.

Les deux courbes les plus désavantageuses C, E′ montrent qu'un marteau de trop faible puissance est désavantageux parce que l'élasticité de la pièce absorbe la plus grande partie de l'énergie.

Un marteau de grande masse et de grande chute est également désavantageux parce que les réactions de l'enclume et la vivacité du choc déterminent une grande perte d'énergie sous forme de vibrations ou de chaleur.

La température des éprouvettes sous le choc du marteau de 30^{kg} tombant de 8^{m} était voisine de 100°; on ne pouvait, particulièrement lorsque l'éprouvette était aplatie, la tenir à la main. Avec le poids de 11^{kg}, ou avec celui de 30^{kg} tombant de 1^{m}, la température de l'éprouvette était peu élevée.

Si l'on considère qu'une élévation de température due au choc est souvent, pour ne pas dire toujours, favorable au martelage, il ne s'ensuit pas qu'il y ait lieu de ne pas employer un

gros marteau à grande hauteur de chute ou à grande vitesse, tous ces éléments étant relatifs à une pièce de masse et de forme déterminées. Il suffit de rappeler que l'acier, métal élastique, se bat de préférence, surtout en mince épaisseur, avec des marteaux de grande vélocité conservant au métal sa température élevée, dispensant ainsi de réchauffages nombreux et récupérant sous cette forme la perte de rendement.

Constatons, avec ces essais, courbes DED′ que l'on peut indifféremment adopter dans une limite particulière à la pièce, soit un marteau de 11^{kg}, chutes de 4^{m} et 8^{m}, soit un marteau de 30^{kg}, chutes de 4^{m}, soit respectivement des puissances de 44^{kgm}, 88^{kgm} et 120^{kgm}.

Il faut que la puissance du marteau soit en rapport avec la nature de la pièce et aussi avec la masse de l'enclume; dans ces conditions, le rendement du marteau par rapport à la presse, ou le rapport $\frac{T_p}{T_m}$, peut s'élever au-dessus de $0^{m},50$, atteindre 0,70 lorsque l'aplatissement est prononcé ou quand l'épaisseur est faible.

C'est particulièrement à la variation d'épaisseur qu'il faut attribuer la variation des rapports $\frac{T_p}{T_m}$; le faible rendement des premiers coups, le plus grand rendement des derniers.

Il faut encore remarquer, dans ces essais, que les courbes d'énergie des marteaux présentent une certaine concavité vers l'axe des abscisses, jusque vers la réduction $= 20^{mm}$; puis elles deviennent convexes. Il s'ensuit que les courbes $C_1D_1E_1$, $C_1'D_1'E_1'$, passant par les origines se trouvent en dessous des courbes CDE, puis en dessus, et que, dans le cas de métal élastique, le martelage à coups d'intensité progressive est d'abord plus avantageux que le martelage à coups répétés, puis il devient moins avantageux dans les fortes réductions.

Essais comparatifs à froid et à chaud sur des tubes de 40mm et de 80mm de hauteur.

Tableau n° 23

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Chocs à énergie progressive à chaud au rouge cerise — POIDS DE 30kg				
	Réductions	Hauteur de chute	Énergie T_m	Énergie T_p à froid	Rapports $\frac{T_p}{T_m}$
Tube de fer.	4	1	30	26	0,87
Hauteur = 40mm.	9	2	60	78,6	1,30
Diamètre extérieur = 30mm.	13,5	3	90	117	1,30
Diamètre intérieur = 25mm.	18	4	120	148,5	1,24
	22,5	5	150	185	1,23
	27	6	180	228,2	1,27
	30	7	210		
	32,5	8	240		

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Chocs à énergie progressive sur des éprouvettes de 80mm de hauteur. — A FROID			A CHAUD				
	Réductions	Hauteur de chute	Énergie T_f	Réductions	Hauteur de chute	Énergie T_c	Énergie T_f	Rapport $\frac{T_c}{M_f}$
Tube de fer.	1	1	30	5	1	30	84	0,357
Hauteur = 40mm.	3	2	60	10,5	2	60	186	0,322
Diam. extér. = 30mm.	5,5	3	90	17	3	90		
Diam. intér. = 25mm.	7	4	120	27	4	120		
	8,8	5	150	37	5	150		
	10,2	6	180	45	6	180		
	11,8	7	210	49,5	7	210		
	13,5	8	240	53	8	240		

ESSAIS A CHAUD AU ROUGE CERISE

(Tableau n° 23.)

Nous avons complété ces essais à froid par des essais à chaud au rouge cerise clair, les éprouvettes étant chauffées dans un four.

Le tableau n° 23 donne les éléments des chocs avec le marteau de 30^{kg} tombant de 1^{m} à 8^{m}. La courbe M des énergies *(fig. 3, pl. VI)* se trouve au-dessous de la courbe B de l'énergie de la presse, sauf vers l'origine.

La valeur moyenne du rapport $\frac{T_p}{T_{mc}}$ est égale à 1,25, celle du marteau de 30^{kg}, chutes de 4^{m}, étant de 0,55, on a :

$$\frac{T_p}{T_{mc}} = 1{,}25 \quad \text{et} \quad \frac{T_p}{T_{mi}} = 0{,}55,$$

soit :

$$\frac{T_{mi}}{T_{mc}} = \frac{1{,}25}{0{,}55} = 2{,}3,$$

c'est-à-dire qu'il faut environ deux fois et demie plus d'énergie pour opérer à froid que pour opérer au rouge cerise vers la réduction de 15^{mm}. Les courbes P et Q de l'épure *(fig. 4)* se rapportent à des éprouvettes de 80^{mm} de longueur dont les éléments de choc sont indiqués dans le même tableau n° 23; les rapports $\frac{T_c}{T_f}$ dont nous n'avons pu faire ressortir que deux valeurs, indiquent qu'il faut environ trois fois moins d'énergie en opérant au rouge cerise qu'en opérant à froid.

OBSERVATIONS GÉNÉRALES SUR LES ESSAIS DE COMPRESSION LENTE ET DE CHOCS

Les divers essais précités fournissent des éléments de comparaison des deux procédés mécaniques de compression ou de martelage des métaux; c'est-à-dire, d'une action analogue lente ou vive.

Il ressort d'une façon précise : que pour les métaux malléables, le rendement mécanique de l'opération directe de la presse peut être quadruple, triple ou au moins double de celui du marteau à moyenne vitesse pratique. Qu'avec les métaux élastiques ou présentant une élasticité relative et une grande résistance, tels que les aciers forgés au rouge sombre et au rouge cerise, le coefficient de rendement relatif s'abaisse, et que la compression vive ou la compression lente exigent à peu près la même quantité d'énergie mécanique pour le forgeage.

Si, d'un autre côté, on considère la chute de température du métal pendant le temps nécessaire aux opérations successives, on voit qu'avec le martelage, l'un des outils, le marteau, n'étant guère en contact avec la pièce, le refroidissement ne se fait pas aussi rapidement qu'avec les outils actionnés par pression lente.

De plus, le choc vif a pour effet de maintenir la température de la pièce ; une grande partie de l'énergie non utilisée pour la déformation se retrouve en chaleur communiquée à l'objet.

Il s'ensuit que, sous ce rapport, le martelage récupère une partie de son infériorité relative.

Au contraire, dans la pression, la pièce est en contact prolongé avec les outils qui absorbent, transmettent rapidement le calorique dans toute la masse métallique de l'engin ; la compression lente développe peu de chaleur, et, si la pièce est de faible masse, de faible épaisseur surtout, l'opération ne peut s'exécuter dans de bonnes conditions.

Cependant, si la masse est grande, la haute température se maintenant pendant le temps nécessaire aux manipulations, celles-ci se feront aussi bien, sinon mieux, à la presse qu'au marteau. C'est dans ce cas une question de puissance, mais il faut bien reconnaître que, pour un même effort de compression à développer, et dans les limites d'une bonne pratique, la presse est un engin de plus grande complexité, de plus grand entretien que le simple marteau-pilon ou autre.

Puissance relative du marteau et de la presse.

Au point de vue dynamique, il n'est guère possible d'établir une comparaison théorique entre le marteau et la presse, car, dans le choc, on possède une énergie vive de la forme $\frac{MV^2}{2} = KEF$; les deux facteurs E et F peuvent varier selon la nature du métal en œuvre jusqu'à la limite pour laquelle l'effort F correspond à la résistance de l'outil, toujours très grande. Le coefficient est variable dans de fortes proportions également.

Dans la presse, on dispose d'un effort lent variable de zéro à la limite finie qui correspond au maximum déterminé que peut donner l'engin.

La comparaison ne saurait être établie que pour des conditions particulières de travail de mêmes pièces, dans le même temps, ce qui ne peut se déduire que pratiquement par des essais.

Dans les limites ordinaires des travaux de forgeage, et pour la fabrication des pièces étampées ou matricées, divers constructeurs admettent pour l'équivalence du marteau et de la presse un rapport variant de 50 à 100 et plus, entre l'effort maximum de la presse et le poids du marteau. Par exemple, avec le rapport 50, un pilon à simple effet de 1000^{kg} correspondrait à une presse de 50.000^{kg}. Or, pour développer un effort moyen F de 50.000^{kg}, le marteau tombant de 1^m de hauteur, possédant une énergie de 1000^{kgm}, il faut que la frappe parcoure un chemin théorique $E = \frac{1000}{50.000} = 0^m,020$.

En adoptant un coefficient de rendement $K = 1/3$, la réduction d'épaisseur de la pièce serait 0,0066, valeur acceptable pour une masse malléable.

Avec le rapport égal à 100, le marteau de 1000^{kg} correspondrait à une presse de 100 tonnes et la dépression produite par

le marteau ne serait plus que 0,0033, ce qui pourrait concorder au travail d'une pièce de fer au rouge exigeant une pression de 15^{kg} par millimètre carré, permettant d'employer une frappe de surface $S = \frac{100.000}{15} = 6.600^{mm^2}$, soit une table d'outil de 50×130.

Lorsqu'on indique un rapport d'équivalence entre ces deux engins, ce rapport ne saurait être que très relatif.

Il convient de tenir compte, non seulement du poids du marteau, mais aussi de la hauteur de chute ou de la vitesse, c'est-à-dire de l'énergie maximum PH ou $\frac{MV^2}{2}$ disponible.

Dans l'établissement de ce rapport, il faut surtout tabler, suivant les cas d'application, sur le déplacement E qui est la principale variable ; il ne faut pas perdre de vue qu'un pilon sera encore utilisable alors que la presse, suffisante pour le travail ordinaire, sera impuissante pour un travail particulier plus grand. C'est une des grandes qualités du marteau de se prêter docilement à tous travaux, à ceux exigeant un faible effort comme à ceux exigeant un effort excessivement grand comparativement à celui que peut produire une presse considérée comme équivalente pratiquement.

D'une manière générale, et supposant le cas des marteaux à chutes libres dont les hauteurs seraient $H = m\sqrt[3]{P}$. En admettant une réduction d'épaisseur ou hauteur d'empreinte $E = nH = mn\sqrt[3]{P}$; F étant l'effort moyen ou résistance de la pièce, K le coefficient de rendement des outils, défini par le rapport $\frac{T_p}{T_m}$ des énergies de la presse et du marteau; on peut poser :

$$EF = KPH \quad \text{soit} \quad \frac{F}{P} = \frac{KH}{E} = \frac{Km\sqrt[3]{P}}{mn\sqrt[3]{P}} = \frac{K}{n},$$

c'est-à-dire que le rapport de l'effort de la presse au poids du marteau serait dans le rapport du coefficient de rendement K au coefficient qui affecte la hauteur de chute pour exprimer la

réduction d'épaisseur. Le coefficient de rendement peut varier de 0,3 à 0,70.

Pour $K = 0{,}40 \quad n = 0{,}01$ on aurait $\frac{F}{P} = \frac{0{,}40}{0{,}01} = 40.$

Avec ce rapport, très peu élevé, un marteau de 3.500^{kg}, chute de 2^{m}, correspondrait à une presse de 140.000^{kg} d'effort moyen. Dans beaucoup de cas, cette presse serait insuffisante alors que le pilon serait encore très avantageux. En tenant compte de la valeur maximum que peut prendre F, il conviendrait de multiplier ce facteur par un coefficient variant de 1,2 à 2 suivant la nature du métal.

A titre d'exemple, considérons le forgeage d'une galette de piston en fer de 400^{mm} de diamètre, soit une surface d'environ 125.000$^{mm^2}$. Admettons que le coup de pilon détermine une réduction utile E = 0^{m},0066, l'effort moyen minimum F serait

$$F = \frac{KPH}{E} = \frac{0{,}40 \times 3.500 \times 1{,}50}{0{,}0066} = 420.000^{kg}.$$

Ainsi, il faudrait une presse de 420 tonnes développant une pression par unité de surface égale à $\frac{420.000}{125.000} = 3^{kg}$ par millimètre carré seulement, ce qui correspond pour du fer soudé à une température d'environ 1300°.

Le rapport $\frac{F}{P} = \frac{420.000}{3.500} = 120.$

La presse serait impuissante dès que la température tomberait à 1200°; le pilon pourrait cependant continuer le travail de manière à achever la pièce en une chaude, ce qui se fait couramment.

Si on compare le pilon de 125 tonnes avec chute de 5^{m} et la presse de 14.000 tonnes des ateliers de Bethléem, qui doivent coopérer aux mêmes travaux, on trouve une dépression totale fictive égale à

$$\frac{125.000 \times 5}{14.000.000} = 0^{m},045.$$

Le rendement du marteau étant supposé de un tiers, la dépression utile pourrait être de $0^m,015$.

Le rapport $\frac{F}{P} = \frac{14.000.000}{125.000} = 112$.

Au Creusot, le marteau de 100 tonnes et une presse de 6.000 tonnes sont installés dans des conditions d'équivalence, le rapport ressort à $\frac{6.000}{100} = 60$.

Il semble que l'on peut moyennement admettre un rapport variant de 60 à 100, cette dernière valeur pouvant être plus élevée encore lorsqu'il s'agit de faibles puissances.

Remarquons que dans le cas de réductions prononcées, le rapport $\frac{F}{P}$ peut être réduit; mais, afin de pouvoir prolonger le travail à des températures peu élevées, il convient d'en augmenter la valeur, ce qui permet d'opérer rapidement, condition essentielle à notre époque. Si, autrefois, les Petin et Gaudet façonnaient des lingots de 0,50 à 0,60 de côté avec le pilon de 3.500^{kg} ayant 2^m de chute, nécessitant des chaudes répétées; aujourd'hui, ces pièces se forgent avec des pilons beaucoup plus forts, 20 à 50 tonnes, ou avec des presses de 500 à 2.000 tonnes qui réduisent au minimum le nombre de réchauffages. Des pilons de 25 tonnes sont, même, jugés insuffisants pour forger des essieux coudés de locomotive, on adopte des presses de force telle que le forgeage se fasse à grande vitesse.

L'action plus centrale attribuée à la presse est aussi toute relative; c'est une question de puissance de l'outil par rapport à la pièce.

Lorsque les pressions extérieures se répartissent sur la surface entière, par exemple, pour un lingot court dans sa lingotière, pour une pièce dans son moule, la presse pouvant prolonger la pression pendant un certain temps, on conçoit que le grain d'un acier puisse être plus resserré dans la masse qu'avec une percussion, même très intense, qui ne s'exerce qu'une seule fois pendant un temps très court.

Mais, pour une pièce libre sur la plus grande partie de sa surface, dès que la déformation voulue est atteinte, l'action maximum de la presse est déterminée et l'énergie dépensée peut être estimée sans variation. Avec le marteau, la déformation sensiblement identique ou équivalente à la précédente pourra être obtenue à cœur à volonté; elle exigera, il est vrai, un supplément d'énergie pour vaincre les réactions d'inertie qui ne sont plus négligeables, mais la quantité dépensée réglera la profondeur jusqu'à laquelle la pression agira avec action efficace. Les molécules étant soumises à des réactions plus intenses pour se déplacer de quantités égales à celles obtenues par la presse, elles se resserrent davantage. Par exemple, considérons deux sphères de métal isotrope: l'une soumise au pilon et amenée à la forme de l'autre pressée lentement. La première pourra être supposée enveloppée par des forces d'inertie dont l'intensité n'est pas à comparer avec celles de la deuxième. Les forces d'inertie peuvent être assimilées à un moule élastique qui tend à s'opposer à la déformation, de sorte que les réactions générales devant être plus intenses avec le pilon qu'avec la presse, donnent un serrage plus énergique des molécules dans les diverses directions rayonnant du centre de la sphère.

Le pilonnage suffisamment énergique serait donc plus efficace que le pressage pour forger dans toutes ses parties et surtout à cœur une pièce dont la plus grande partie de la surface serait libre.

Si nous nous reportons aux essais de M. Chômienne sur des cylindres d'acier chauffés au rouge et écrasés de mêmes quantités au pilon et à la presse, nous voyons *(fig. 42)* que la déformation générale de la surface extérieure produite par le pilon est moins prononcée que celle due à la presse tracé pointillé. Nous voyons aussi, sans même calculer les volumes respectifs (1),

(1) Le calcul fait ressortir une différence de volume de 30^{cm3}; le volume primitif des deux cylindres de 100^{mm} de diamètre sur 100^{mm} de hauteur étant de 785^{cm3}, la différence serait de près de 4 0/0 du volume primitif, valeur relative très élevée.

que celui de l'éprouvette pressée A est sensiblement plus grand que celui de l'éprouvette percutée B. Comme les volumes primitifs étaient égaux, il s'ensuit que la densité de B est plus grande que celle de A. Le grain serait donc plus serré avec le pilon qu'avec la presse.

Cette remarque s'applique à la plupart des essais analogues aux précédents. M. Chômienne a reconnu, en découpant les éprouvettes, qu'avec le pilon, le grain était très serré dans toute la masse et particulièrement vers les parties avoisinant

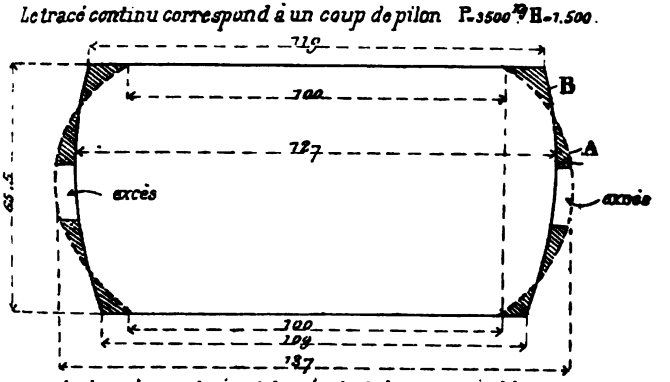


Fig. 42

les faces d'action des outils; tandis qu'avec la presse, le grain, moins serré à l'aspect des figures que celui de l'éprouvette précédente, l'était surtout moins vers le pourtour où les fibres libres, en s'infléchissant fortement, avait tendance à se séparer; le métal était donc moins dense.

On conçoit d'ailleurs que, dans le cas de la presse, les parties en contact prolongé avec les outils se refroidissent rapidement, présentent alors plus de résistance que les parties centrales qui cèdent et se déforment davantage, tandis qu'avec le marteau le contact pendant quelques dixièmes de seconde n'a presque

pas d'influence, et l'ensemble de la pièce se déforme avec une température plus uniforme et, par suite, donne lieu à des déformations plus générales qui, dans certains cas, sont plus avantageuses pour le forgeage.

Dans les gros lingots d'acier pour arbres creux ou pour canons, les éléments centraux découpés et éprouvés à la traction donnent des différences en faveur du martelage entre les résistances et les allongements des barrettes d'essais, lorsque le travail à la presse ou au pilon a été conduit dans des conditions analogues. Il ne faut cependant pas perdre de vue que le pilonnage produisant des déformations brusques, le métal ne peut le supporter que s'il possède une ductilité suffisante, que l'absence de vibrations dans le travail de la presse permet de façonner sans défauts les métaux plus ou moins élastiques qui ne pourraient subir les chocs violents, particulièrement lorsque la section des pièces varie brusquement.

Les essais relatifs aux divers modes de déformation partielle permanente par pression montrent l'indépendance des lois de la distribution des déformations et de la vitesse de transmission des efforts. Les éprouvettes tubulaires à nombreux plis la font ressortir d'une façon frappante. La seule influence de la vitesse par rapport aux déformations est qu'un même outil exerce son action sur une surface d'autant moins étendue que cette vitesse est plus grande, lorsque les dimensions de l'outil sont beaucoup plus petites que celles de la pièce.

Cette action est d'autant plus localisée dans la direction de l'effort que l'énergie est plus vive en même temps que plus grande.

C'est un phénomène mécanique de caractère général, dont une application est bien connue dans le frottement et que nous retrouverons plus loin.

Les marteaux-pilons et les presses à forger de fortes dimensions, de même que les petits marteaux à bras ou mécaniques et les nombreuses petites presses à cames ou autres ont leurs

applications particulières. La bonne pratique sait adopter le meilleur procédé en vue de la plus parfaite exécution.

Remarquons que la presse est appliquée depuis longtemps à la pointerie, à la clouterie et que dans la fabrication à froid ou à chaud de quantité d'articles on préfère opérer par pression lente.

De même, l'estampage a adopté la presse qui donne moins de rebuts qu'avec le choc brutal du mouton, déchirant la paroi emboutie.

Dans le travail des pièces à froid, outre que le rendement est plus élevé de moitié en ce qui concerne l'énergie dépensée directe, la déformation se fait dans de meilleures conditions et les machines se détériorent beaucoup moins rapidement qu'en employant le marteau ou la compression très vive.

On attribue aussi à la presse un travail plus rapide, en partie dû au retour du pilon, à sa levée, aux manœuvres plus sûres de la pièce. Cet avantage est réel, et pour les grosses pièces, il est important, parce qu'il diminue le nombre de réchauffages et le prix de revient.

La rapidité pour les pièces cylindriques étampées peut être de deux à trois fois plus grande que celle du marteau. La presse est donc très avantageuse pour forger les gros arbres, les canons, les frettes (1), etc., si elle est de force suffisante, si son action est relativement accélérée et permet de la considérer comme une percussion lente à *pouvoir* prolongé à volonté.

La presse est sans contredit un outil de plus grande précision que le pilon et dont on peut régler plus facilement une action limitée et répétée.

Dans les grandes forges bien organisées, on trouve, à côté du marteau, la presse à action alternative, et cette autre presse à action continue appelée laminoir; ces trois engins concourent à des travaux communs ou distincts.

(1) En Angleterre, les grosses presses sont beaucoup plus répandues que les gros pilons; tandis qu'en France, c'est l'inverse.

On trouve ces outils sous toutes dimensions, et de puissance en rapport avec les pièces à mettre en œuvre.

III. — Engins de martelage.

Les engins de martelage sont nombreux et présentent des dispositions très variées en vue de faciliter l'exécution des pièces. Nous les signalerons plus particulièrement, en considérant les objets façonnés. Indiquons ici quelques types qui permettent de comparer les anciens marteaux avec ceux actuels.

Nous ne nous arrêterons pas aux marteaux et enclumes pour le travail à la main, pour le façonnage de toutes pièces courantes de petites dimensions que mettent en œuvre les forgerons, serruriers, maréchaux ou mécaniciens.

MARTEAUX MÉCANIQUES

Les marteaux mécaniques sont actionnés soit par des mécanismes rigides, soit par des liaisons élastiques, ou avec le concours de l'air, de la vapeur, de l'eau sous pression.

Les anciens marteaux dits martinets à mécanisme manœuvré à bras par manivelle, étaient constitués comme le montre la *figure 1*, *planche VII*.

Le manche D du marteau était muni d'un axe E horizontal ; son extrémité était garnie d'une touche à galet H, contre laquelle agissait la came L montée sur l'arbre de la manivelle, lequel portait un volant I facilitant la manœuvre.

Ce marteau s'employait pour le façonnage de pièces moyennes et beaucoup de forges d'une importance relative en possédaient.

Actuellement, pour les petites pièces, on emploie soit le marteau à manche *(fig. 3)*, actionné à la main et rappelé par un ressort, soit le pilon *(fig. 4)*, actionné par leviers et renvoyé par un essort. Un tel pilon a une frappe de 40^{kg} et une course de $0^{m},60$.

Dans les forges importantes où on ne pouvait disposer d'une chute d'eau, les martinets étaient manœuvrés par plusieurs hommes et présentaient la disposition *figure 2, planche XIII* (1). Cette machine était manœuvrée par six hommes en tirant deux cordes accrochées à des chevilles plantées perpendiculairement sur un des rais des balanciers (volants) auxquels elles servent de manivelle.

M marteau ou martinet pesant 400 livres ou moins.

B bras du martinet s'appuyant sur la bascule supérieure R par l'intermédiaire du ressort T.

C cric assemblé par une bride avec la bascule R.

L tambour de la lanterne engrenant avec le cric C d'une façon intermittente pour la levée du marteau.

V balanciers ou volants montés sur les extrémités de l'arbre au tambour L.

X l'une des chevilles sur laquelle la corde E est attachée et sur laquelle tirent trois forgerons. Ce martinet était perpendiculairement employé pour radouber les ancres dans les ports, ou pour autres grosses pièces.

Les marteaux primitifs oscillants mus par une roue hydraulique étaient du type *figure A* ci-contre. Le manche du marteau était actionné par des cames montées sur l'arbre de la roue hydraulique. Une pièce de bois élastique était souvent disposée pour former ressort et rabattre rapidement le marteau. L'un des grands défauts des marteaux à bascule était la levée à hauteur invariable, de telle sorte que le coup était d'autant plus fort que l'épaisseur de la pièce était plus faible.

Pendant la première moitié de ce siècle, un grand nombre de marteaux dits de côté furent construits en fonte et commandés par des transmissions auxiliaires en munissant l'arbre des cames d'un volant *(fig. 1-2, pl. VIII)*.

De même, l'ancien martinet à bascule faisait encore l'objet

(1) Ces figures sont tirées de l'*Encyclopédie*.

d'applications importantes, vers 1860, c'est-à-dire vingt ans après l'invention du pilon à vapeur, ainsi que le montre les *figures 3-4* (1) d'un tel marteau actionné directement par un moteur à vapeur et arbre à cames.

Les plus gros marteaux étaient du type dit frontal *(fig. 5)*; ils apparurent vers la fin du siècle dernier et leur poids a atteint jusqu'à 8.000^{kg} avec une levée de 0^{m},50, soit une énergie de 4.000^{kgm}.

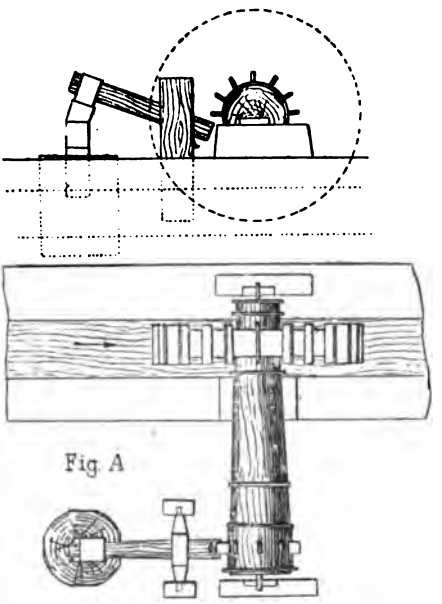


Fig. A

Il existe d'anciennes forges à fabrications spéciales qui emploient encore pour l'étirage et le finissage des barres d'acier, par exemple, le marteau à queue mû par roue hydraulique. On y conserve un outillage qui semble démodé, mais qui répond néanmoins à certaines conditions avantageuses.

Les marteaux modernes de petites et de moyennes dimensions sont ordinairement mus par une commande avec courroie et mécanisme intermédiaire à galets ou manivelle et bielle reliée à la masse frappante par un ressort à lames multiples et brides articulées évitant une réaction trop vive de la masse sur le mécanisme moteur.

C'est ainsi que sont constitués les marteaux *(fig. 1, 2, 3,*

(1) *Portefeuille des machines* (mai 1861).

pl. IX) construits par la maison Bouhey depuis 1878. Ces marteaux sont très répandus dans les ateliers de construction de machines, où l'on exécute des petites pièces courantes. Le poids de la masse frappante, toujours bien guidée dans des glissières, varie de 10 à 125^{kg}; le nombre de coups par minute varie de 500 à 150 suivant le poids de l'outil.

Le marteau *(fig. 4)* de Booth (1881) se prête aussi à tous travaux généraux de forgeage se rapportant à des petites pièces.

Le marteau *(fig. 5)* de Hasse est à lien d'attache flexible évitant à peu près complètement les vibrations sur le mécanisme.

Marteaux dits atmosphériques.

Les marteaux mécaniques à matelas d'air se sont particulièrement répandus en ces dernières années.

Le ressort constitué par l'air qui se trouve entre la frappe ou marteau et le piston plongeur qui l'actionne, prévient toute transmission de réaction vive sur les organes du mécanisme. Ces marteaux ont de plus le grand avantage de permettre de régler par la simple manœuvre d'un robinet (marteau d'Arns, *fig. 1, 2, 3, pl. X*) l'intensité des coups, qui est aussi faible qu'on le désire, et atteint rapidement, à volonté, l'énergie maximum.

Il en est de même des types Chenot *(fig. 4-5)* que construit la maison Piat sur différents modèles à masse frappante dont le poids varie de 25 à 200^{kg}, le nombre de coups par minute étant de 300 à 100.

(Nous ne pouvons nous attarder à la description de ces engins, dont les dessins suffisent pour les comparer et laisser trace de leur existence.)

Marteaux-pilons à vapeur.

Le premier marteau-pilon à action directe de la vapeur construit par Bourdon, au Creusot, en 1840, comprenait *(fig. 1,*

pl. XI) (1) un mouton en fonte relié par une tige à un piston recevant l'action de la vapeur, pour soulever la masse qui retombait par son poids propre, lorsque la vapeur s'échappait dans l'atmosphère.

L'action de la vapeur était réglée par le jeu d'un tiroir actionné par un levier manœuvré à la main.

Le marteau était guidé par des glissières ménagées dans quatre jambages formant bâti surmonté par le cylindre à vapeur assemblé avec la traverse supérieure reliant les montants étayés par des jambages. Cet ensemble reposait sur une maçonnerie. Le tas ou chabotte comprenait une masse de fonte reposant sur une fondation constituée par des madriers, afin d'assurer une certaine élasticité et d'isoler les effets du choc.

Le marteau de ce pilon, établi pour le travail des grosses pièces de l'époque, pesait 2.500 kilogrammes, avec hauteur de chute maximum de 2^{m}, soit une puissance de 5.000 kilogrammètres.

Depuis la création du pilon, les grandes forges l'ont substitué peu à peu aux autres marteaux mécaniques, et cet outil, si docile, s'est multiplié et comporte des puissances variant de 500 à 625.000 kilogrammètres. Le plus puissant pilon est actuellement celui des forges de Bethléem *(fig. 2, 3, 4, pl. XI)* (2), aux États-Unis, dont l'installation s'est terminée en 1893. La partie active pèse 125 tonnes; sa course est de 5 mètres; elle pourra atteindre près de 6^{m}. La chabotte a un poids de 2.150 tonnes, soit dix-sept fois celui de la masse frappante.

Ce colossal engin sert pour la fabrication du matériel de guerre : canons, blindages ; pour les grosses pièces de forge de la marine et de l'industrie.

Les pilons à vapeur se caractérisent ordinairement par l'action motrice qui agit simplement pour soulever le marteau ou qui

(1) Mémoire de M. G. Boutmy, adressé à la Société des Ingénieurs civils, 1884.

(2) *Génie Civil*, 1894, tome XXIV, n° 23.

agit aussi pour précipiter l'outil avec rapidité vers l'enclume. Dans le premier cas, le marteau est dit à simple effet; dans le second, il est à double effet. Le marteau à double effet a toujours une tige plus grosse que celui à simple effet, dont la masse frappante est généralement guidée par des glissières, ce qui conduit à l'adoption d'un bâti à deux jambages, tels que celui *figure 1, planche XII.*

Le marteau à double effet *(fig. 2)* comporte également deux jambages, mais la tige seule sert de guide au marteau, de même que dans les modèles ordinaires à un seul jambage *(fig. 4)*.

Dans le cas de manœuvre rapide, le pilon à double effet est employé de préférence à celui à simple effet, et la commande est automatique par l'adjonction d'un mécanisme simple agissant sur les leviers de la distribution; ce sont les marteaux dits automoteurs battant jusqu'à 500 coups par minute *(fig. 3)*.

Les marteaux automoteurs sont généralement pourvus d'un mécanisme de manœuvre permettant au pilonnier, au moyen d'un seul levier, de faire marcher le marteau automatiquement, de régler à volonté la longueur de la course avec la plus grande précision, de donner des coups légers ou forts suivant les besoins. De plus, le pilonnier peut faire fonctionner le marteau à la main pour frapper un coup ou une succession de coups peu rapides, pour tenir le marteau soulevé pendant qu'on pose la pièce ou qu'on la retourne sur l'enclume, et qu'il contrôle, sans difficulté, le marteau aussi parfaitement que s'il s'agissait d'un marteau ordinaire tenu à la main.

On voit que ce marteau-pilon possède toutes les qualités d'un bon outil : simplicité de construction, grande variation de puissance, grande variation de vitesse, docilité merveilleuse.

Les différentes figures de la *planche XII* montrent les marteaux adoptés, soit pour le forgeage de pièces courantes, soit pour le façonnage de pièces spéciales nécessitant, par exemple, un grand écartement des jambages, cas de pièces circulaires de grand diamètre.

Quelquefois, comme *figure 5*, le marteau de petites dimensions est disposé en l'air; il est fixé à une poutre horizontale, de manière à laisser le champ complètement libre au-dessous.

Ou encore, le pilon *figure 6* peut pivoter autour d'un axe vertical.

Le marteau à vapeur est aussi disposé horizontalement *(fig. 8)*, ce qui facilite, dans certains cas, les opérations.

On conçoit qu'au lieu de vapeur, l'agent moteur puisse être un gaz comprimé, tel que l'air, ou un gaz explosif comme dans le marteau-pilon de Robson *(fig. 1, pl. XIII)*. L'électricité a été aussi appliquée au pilon *(fig. 2)* par M. Marcel Deprez en 1882; l'outil est également d'une docilité remarquable. Le modèle de Van Depoele *(fig. 3)* à deux jambages est plus récent (1890).

Marteaux hydrauliques.

L'eau sous pression est aussi employée pour actionner le pilon par coups répétés et relativement rapides avec effet prolongé de l'action motrice, de manière à combiner la percussion avec la pression lente, ce qui, pour certains travaux, est avantageux et permet de mettre bien à dimensions en épaisseur, par la possibilité de régler exactement la course constante de l'outil.

Le premier marteau à transmetteur hydraulique a été construit par Guillemin et Minary (1851); d'autres applications analogues furent essayées et ne répondirent pas à l'attente des inventeurs, parmi lesquels on cite Bourdon. L'idée a été reprise en ces dernières années et divers constructeurs ont établi des marteaux dits hydrauliques ou presses-marteaux donnant de bons résultats.

La constitution de ces marteaux a beaucoup d'analogie avec celle d'une presse, comme le montre la *figure 4, pl. XIII*, du marteau de Higginson et les *figures 5-6* du marteau de Allen, assez récent, dont nous signalerons les particularités.

Marteau hydraulique (modèle Allen).

Le marteau-presse de Allen, à Galloway, représenté par les *figures 5* et *6*, *pl. XIII*, (1), comporte un mouton cylindrique M armé d'une frappe F de forme appropriée au travail. Ce mouton formant piston dans un cylindre C est actionné par une pression d'eau produite au moyen de deux pompes à action simultanée dont la capacité D est constamment en communication avec le cylindre C. Le jeu des pompes produit les déplacements rapides du marteau qui est constamment sollicité de bas en haut par l'action de la vapeur agissant sur un piston E monté sur la tige supérieure. Il s'ensuit que l'eau du cylindre C est refoulée dans la pompe D lorsque les pistons de pompe s'écartent et tant qu'il n'y a pas changement de volume d'eau, le marteau s'abaisse toujours de la même quantité et peut opérer sur une pièce d'épaisseur à rendre constante.

Pour régler des positions variables, il suffit de faire varier le volume d'eau dans le cylindre C, soit le diminuer pour augmenter l'écartement entre la frappe et l'enclume, ce qui augmente le volume de vapeur dans le cylindre supérieur, soit augmenter le volume d'eau pour diminuer la distance entre les outils, ce qui diminue aussi le volume de vapeur formant ressort de levée. Un distributeur F à trois tubulures *(fig. 6)* permet de régler facilement le volume d'eau en l'actionnant par un levier L. La tubulure I correspond au tuyau de communication; celle H au tuyau d'introduction d'eau; celle G au tuyau d'échappement.

L'addition d'eau doit se faire pendant que les pistons de pompe s'écartent, et il faut aussi avoir soin de mettre l'obturateur à sa position moyenne de fermeture des orifices avant que le marteau agisse sur la pièce, sinon le volume d'eau serait réduit.

(1) Dessin de la *Revue industrielle*, 19 décembre 1891, page 501.

La manœuvre du levier L réglant la position du distributeur permet toute précision dans le jeu du marteau. On peut arrêter, pour ainsi dire, instantanément, le marteau en pleine chute ; ou peut, à chaque course, le faire descendre plus bas, suivant la nécessité du travail.

Les pompes sont munies de soupapes de sûreté correspondant à la pression maximum. Le piston a une course de 73^{mm} et un diamètre de 762^{mm}, de sorte qu'avec une pression de 473^{kg} par centimètre carré, la puissance est de 1.700 tonnes.

Ce marteau-presse convient bien pour le travail des arbres cylindriques, car une fois le marteau réglé pour le diamètre voulu, il suffit de présenter la pièce régulièrement. Ce marteau peut battre 20 à 40 coups par minute suivant le travail à exécuter ; il a été installé dans les ateliers Bessemer et Cie.

CHAPITRE III

I. — Applications générales des procédés de pressage et de martelage.

Les pressions lentes et les pressions vives sont couramment appliquées à diverses opérations de façonnage qui donnent lieu à des procédés que l'on caractérise par les formes des outils ou par celles de la pièce.

Ce sont : le maquetage, le cinglage, l'étirage, le corroyage, le chassage, le parage, le platinage, le battage, le planage, le refoulage, le mandrinage, le sertissage, l'étampage, le matriçage, le rivetage, le matage, le soudage, le perçage.

Nous y ajouterons comme opérations auxiliaires : le coupage ou tranchage, le cisaillage, le fendage, le sciage, le taillage, le moletage.

Maquetage.

Le maquetage consiste à former une maquette de fer, une ébauche de massiau avec une loupe de puddlage que l'on agglutine, que l'on maque, compresse, pour en chasser les scories. Cette espèce de pétrissage s'obtient avec des presses à levier dites presses à maquer, appelées aussi squeezers *(fig. 43)*.

Fig. 44 Fig. 45

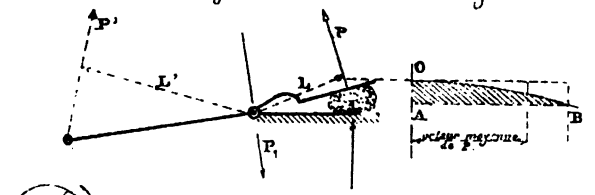
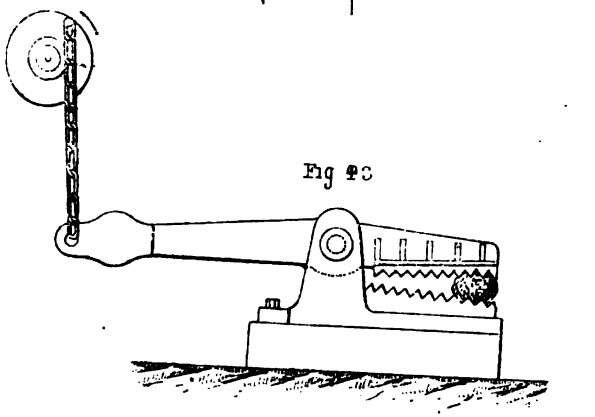


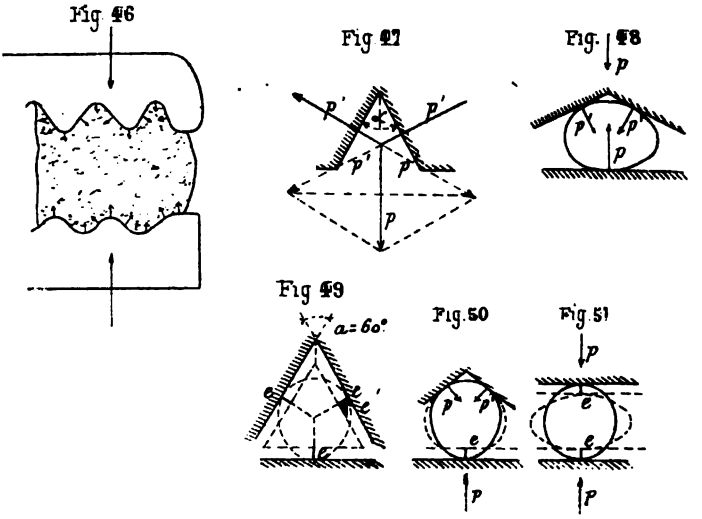
Fig 43



La loupe ou balle, placée entre les mâchoires, est comprimée par la tête du levier oscillant qui, agissant d'une façon intermittente, permet à l'ouvrier maqueur de retourner la loupe, de la présenter en tous sens pour en exprimer le laitier, et façonner une pièce grossièrement prismatique. La partie active de l'outil est élargie et cannelée, striée fortement de manière à développer des réactions dirigées en tous sens et augmenter la somme totale des pressions pour une valeur déterminée de

l'effort transmis par l'outil. On voit que l'outil agit progressivement, pour ainsi dire sans choc, s'il attaque le métal dès que son oscillation de haut en bas a lieu. De plus, au début du travail, les dimensions transversales sont maxima, le métal est à haute température, la pièce est présentée vers l'extrémité de la tête du levier, tandis qu'à la fin de l'opération, les dimensions transversales sont réduites, le métal est à une température plus basse, il présente plus de résistance aux déformations, la pièce est alors pressée plus près de l'articulation, la réaction agit avec un plus petit bras de levier, de sorte que cet outil est convenablement disposé pour un travail méthodique et économique.

Ce travail étant très variable, on ne peut estimer la puis-



sance mécanique d'un tel outil que par la considération d'un cas particulier d'application correspondant, par exemple, à la compression d'une balle dont la réaction totale P, résultante des réactions partielles, est appliquée à une distance L du centre de l'articulation *(fig. 44)*. Si la force motrice P' agit avec un

bras de levier L', P_1 étant la réaction sur l'articulation de rayon r, et f le coefficient de frottement, on aura la relation : $P'L' = PL + P_1 fr$, qui permet de déduire l'un ou l'autre des efforts P ou P' en fonction des données. Dans un essai on pourra mesurer P' et obtenir P ; il faut opérer lentement pour ne pas développer de résistances d'inertie. Pour chaque oscillation, P subit une variation depuis zéro, moment où le contact commence, jusqu'à une valeur maximum correspondant au point le plus bas de l'oscillation, donnant ainsi un diagramme OAB *(fig. 45)* qui représente le travail mécanique développé pendant l'oscillation pour laquelle OA est le chemin parcouru par le point d'application de la force P, les variations de P étant les ordonnées telles que AB. Supposons que sur une surface d'action moyenne de dimensions ($0{,}100 \times 0{,}200 = 0^{mq}{,}02$) s'exerce une pression moyenne de 4^{kg} par millimètre carré, l'effort moyen P serait 80.000^{kg}; si OA est égal à 0,10, le travail serait de 8.000^{kgm}.

La *figure 46* montre que si les mâchoires sont cannelées, les réactions s'exercent dans différentes directions et produisent un effet plus grand, car la somme de toutes les réactions normales est plus grande que l'effort résultant P. Pour faire ressortir cette action des formes en coin ou en V, considérons l'un des éléments *(fig. 47)*, à faces symétriques, faisant entre elles un angle α. Une force p donnera lieu à deux réactions p' dont la valeur $2p' = \dfrac{p}{\sin \dfrac{\alpha}{2}} > p$. La somme $2p'$ est donc d'autant plus grande par rapport à p que l'angle α diminue.

Pour $\alpha = 180°$ les deux réactions se confondent en une seule égale à p.

Pour des valeurs de α supérieures à 60°, p' est plus petit que p, mais la somme $2p'$ est néanmoins plus grande que p, de sorte que si la matière cède sous l'effort p', l'action utile se produira dans les deux directions obliques. Si la matière ne

cédait pas sous l'effort p', la forme en V deviendrait défavorable; il y aurait lieu, dans le cas où l'effort p serait suffisant pour produire une action utile, d'opposer à la cannelure ou au coin saillant une face plane qui recevrait l'action de p; la déformation se produirait alors sur une face plane *(fig. 48)*. Dans ce dernier cas, pour obtenir une même pression dans les trois directions, l'angle α doit être égal à 60° *(fig. 49)*. Cet angle étant plus petit que 60°, les réactions p' deviennent chacune plus grandes que p.

Ainsi pour $\alpha = 45°$

$$2p' = \frac{p}{0{,}383} = 2{,}6p.$$

Il conviendrait donc d'adopter un angle $\alpha = 60°$ pour obtenir une égale pression normale sur les trois faces d'appui et, par suite, un égal aplatissement dans le sens des efforts p et p'. La pratique ne descend pas au-dessous de 60°, afin d'éviter des saillies vives qui donneraient lieu à des plissures superficielles.

L'estimation du travail d'aplatissement pendant un faible déplacement e permettant de supposer les efforts p et p' constants et égaux donnerait pour $\alpha = 60°$

$$T = pe + 2p'e = 3p'e.$$

Si la pièce d'appui est fixe, la tête mobile se déplace de $3e$ verticalement, ce que montre d'ailleurs aisément la *figure 50*, attendu que $e' = \dfrac{e}{\sin\dfrac{\alpha}{2}} = 2e$, correspond au déplacement vertical se rapportant au déplacement normal e des faces du V. La face d'appui horizontale étant fixe, la pièce s'affaisse de e sur ladite face et ce déplacement s'ajoute à celui e' pour donner un déplacement total de l'outil égal à $3e$.

Lorsque les efforts p' supposés plus petits que p et insuffisants pour déplacer la matière, alors que p donne lieu à un aplatissement e *(fig. 50)*, le travail utile se réduirait à

$$T = pe.$$

L'emploi de formes en V étant rejeté pour recourir à une forme plane, celle-ci, produisant un aplatissement égal à celui de la face fixe *(fig. 51)* donnerait lieu à un travail total :

$$T = 2pe.$$

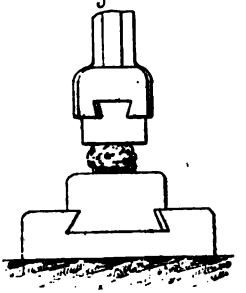
Avec des surfaces planes l'aplatissement est plus prononcé qu'avec des cannelures dont les réactions obliques resserrent le métal vers le cœur de la pièce, lui donnent plus d'homogénéité et le forcent à se déplacer longitudinalement.

Les cannelures empêchent aussi, pour le cas particulier de l'action oblique des mâchoires d'un *squeezer*, la tendance *au glissement hors de l'outil.*

Cinglage.

Lorsque le métal est aggluti né par martelage, on donne à l'opération le nom de cinglage. On emploie des marteaux et des enclumes à surfaces d'action planes ou légèrement concaves, par usure, afin que les pressions tendent à souder les éléments tout en permettant aux scories de se dégager par les parties libres. Les coups doivent être suffisamment énergiques pour développer des actions vives intérieures expulsant les scories du cœur de la pièce. Un coup puissant trop vif écraserait la balle, la désagrégerait en donnant lieu à des projections de métal ; un coup très vif de petit marteau ferait pénétrer celui-ci dans la masse, l'effet serait localisé ; un coup puissant et lent agirait comme une presse, l'expulsion de la scorie se ferait moins bien qu'au pilon à coup vif muni d'une frappe de surface suffisante *(fig. 52)* permettant de donner à la pièce une forme parallélipipédique ébauchée.

Fig. 52



II. — Étirage.

L'étirage consiste à allonger une pièce, à réduire ses dimensions transversales, soit en vue d'un façonnage définitif, soit pour préparer une ébauche prismatique en voulant donner au métal, par un étirage plus ou moins prononcé, plus de corps, d'homogénéité, de résistance, de ductilité, si, toutefois, le métal se prête à l'amélioration de ses qualités en subissant un certain allongement par pressions transversales.

Il convient d'étirer en faisant agir les outils alternativement sur les faces opposées et en ne s'écartant pas trop de la section carrée pour les petites et moyennes sections, ou de la section octogonale pour les fortes sections, de manière à se rapprocher autant que possible de la section circulaire qui est celle de moindre surface pour un même volume. A chaque coup des outils, le métal se déplace dans toutes directions; la pièce est réduite sur une seule de ses dimensions, elle est dilatée transversalement et longitudinalement. Les déplacements longitudinaux sont ceux utiles, il faut donc chercher à les rendre maxima. Pour cela, un excellent procédé consiste à marteler ou presser simultanément les quatre faces; les déplacements transversaux se faisant tous vers le centre et s'obliquant, le métal fortement serré s'écoule suivant la longueur. Les marteaux et les presses à outils multiples sont peu commodes pour les travaux variés, ce qui motive le peu d'applications de ce procédé très rationnel.

L'effet utile d'étirage dépend de la forme du marteau, de celle de l'enclume, de l'intensité des coups, de la malléabilité du métal.

Si le marteau a des arêtes vives, une table plane plus petite que la largeur de la pièce, si l'enclume est large et plate, le choc ou pression produira une empreinte, déplacera le métal

davantage en largeur qu'en longueur et cela d'autant plus que l'épaisseur sera forte par rapport à la largeur, attendu qu'il y a plus grand déplacement dans le sens de la moindre résistance, soit celui de la largeur. Pour éviter de plisser la surface, la table doit être assez longue pour agir sur toute la largeur de la pièce, et suffisamment large pour agir sur une surface de quelque étendue, de manière à ne pas trop pénétrer, à ne pas déterminer des empreintes à arêtes se multipliant et difficiles à faire disparaître.

Il ne faut pas non plus exagérer l'étendue du contact de l'outil dans le sens de l'étirage, sinon le rendement est réduit, et il faut des efforts beaucoup plus intenses.

Pour apprécier l'influence de cette étendue de contact sur la variation des efforts nécessaires pour produire une déformation appréciable, particulièrement lorsqu'on opère sur de faibles épaisseurs, il suffit de presser des éprouvettes cylindriques dont l'axe d'action se trouve à égale distance du pourtour de la pièce.

Avec des disques de plomb de 5^{mm} d'épaisseur et de diamètres variables soumis à la presse, on trouve les valeurs suivantes au moment où la réduction d'épaisseur est de $0^{mm},5$.

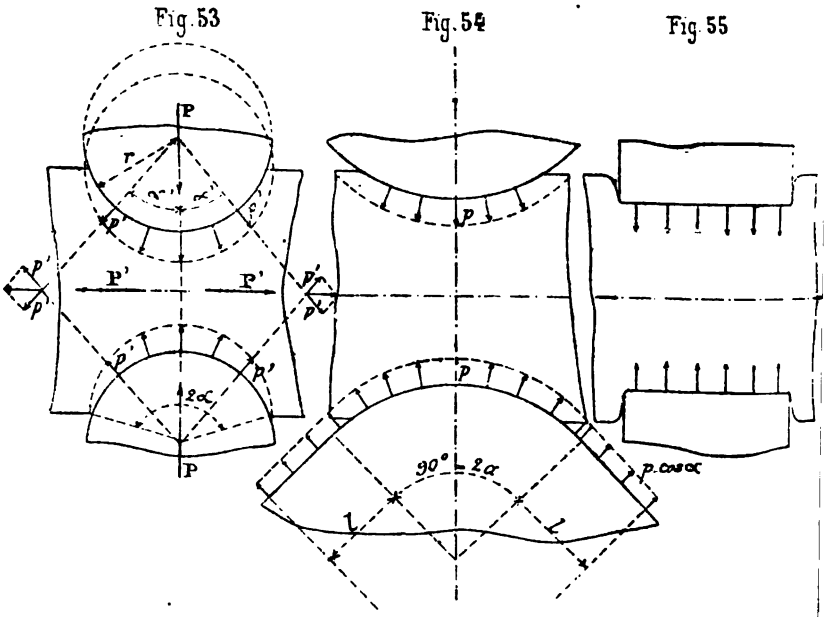
Diamètres primitifs ;							
10	20	30	40	50	60	800	100^{mm}
Diamètres sous charge :							
10,5	21,5	31,6	42,15	52,7	63,3	84,3	105,2
Pressions totales :							
90	800	2.900	6.100	11.000	17.800	33.800	49.800^{kgs}
Pressions par millimètre carré de section sous charge :							
1,04	2,2	3,7	4,4	5,02	5,70	6,05	6,75

Ainsi dans les limites de ces diamètres la valeur de la résistance par millimètre carré peut varier de 1 à $6^{kg},75$.

On conçoit donc qu'avec des pannes aussi larges que longues, par exemple, la pression doit être plus forte qu'avec des pannes moins larges que longues, la surface totale restant la

même. Avec de grandes surfaces de contact se rapprochant du cercle ou du carré, la matière est davantage retenue, les frottements sont plus énergiques dans les diverses directions d'écoulement du métal. Il va sans dire que les pressions variant, ainsi que nous l'avons vu dans les premiers chapitres, suivant les épaisseurs des pièces, si on opère avec des pannes étroites sur de fortes épaisseurs, il suffira de faibles efforts, mais la déformation sera localisée vers la surface.

Pour obtenir des pressions suffisantes dont l'action détermine



quelque peu le renflement des faces latérales, il faut employer des pannes suffisamment larges qui nécessitent une plus grande pression par unité de surface et, par suite, un effort total capable de produire l'effet que l'on recherche.

De larges pannes serrant davantage le métal conviennent

donc pour le soudage, des pannes étroites conviennent mieux pour l'étirage.

Avec des tables planes, les pressions actives sont normales aux faces et, par suite, sont moins favorables à l'étirage que les tables ou pannes convexes qui donnent lieu à des réactions obliques, à des composantes longitudinales *(fig. 53)* d'autant plus grandes que le rayon de courbure est plus petit et que le contact se rapproche d'un angle au centre de raccord de 90°.

En effet, si on admet que, pendant la pénétration, les forces normales à la surface d'action de l'outil sont proportionnelles aux déplacements élémentaires normaux, ces réactions par unité de surface varieront comme le cosinus de l'angle α' et seront reliées entre elles par la relation

$$\frac{p}{p'} = \frac{\cos 0}{\cos \alpha'} \quad \text{soit} \quad p' = p \cos \alpha';$$

pour $\alpha' = 90°$, la réaction est nulle; elle est maximum et égale à p, pour $\alpha = 0$.

La somme des réactions sur toute la surface d'une panne de largeur b, de rayon r et d'arc de contact 2α serait :

$$\int_{-\alpha}^{+\alpha} p' r d\alpha' b = pbr \int_{-\alpha}^{+\alpha} \cos \alpha' d\alpha' = 2pbr \sin \alpha.$$

La somme des projections des réactions d'une panne sur l'axe de l'outil donne la pression P qui le sollicite, soit :

$$P = \int_{-\alpha}^{+\alpha} bp' r d\alpha' \cos \alpha' = bpr \int_{-\alpha}^{+\alpha} \cos^2 \alpha' d\alpha'$$

$$= 2bpr \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4} \right)$$

Les projections, sur l'axe horizontal de la pièce, des réactions normales telles que $p'brd\alpha'$, qui s'exercent sur chaque demi-panne, donnent les forces longitudinales favorables à l'étirage.

La projection de la réaction $p'brd\alpha'$ ou $pbr \cos \alpha' d\alpha'$ est $pbr \cos \alpha \sin \alpha d\alpha$.

La valeur maximum correspond donc à un angle de 45° pour lequel $\cos \alpha = \sin \alpha$, soit :

$$pbr \cos 45° \sin 45° = 0{,}50\, pbr.$$

On voit que, pour obtenir le maximum de réaction d'étirage, il convient d'adopter des formes à arc de 90° raccordé par deux tangentes à 45°.

La somme des projections suivant l'axe de la pièce, pour deux moitiés de pannes opposées et symétriques d'un même côté de l'axe des outils, serait :

$$P' = \int_0^{\alpha} 2pbr \cos\alpha \sin\alpha d\alpha = 2pbr \frac{\sin^2\alpha}{2} = pbr \sin^2\alpha.$$

Si, à partir de l'angle α, la panne est prolongée par des surfaces planes tangentielles *(fig. 54)*, on estimera aisément les réactions égales entre elles par unité de surface, leurs projections sur l'axe de l'outil et leurs projections sur l'axe de la pièce.

Soit l la longueur de contact des faces. Chacune d'elles sera soumise à une réaction unitaire $p \cos\alpha$, α étant l'angle limite de la partie cylindrique.

Sur la surface de longueur l, de largeur b, la pression totale sera : $blp \cos\alpha$ et sur deux faces $2blp \cos\alpha$.

Les projections des pressions des deux faces d'une même panne sur l'axe de l'outil seront :

$$2blp \cos^2\alpha.$$

Les projections des réactions de deux faces opposées symétriques des deux outils, sur l'axe de la pièce, seront :

$$2blp \cos\alpha \sin\alpha.$$

Il suffira donc d'ajouter ces valeurs aux sommes obtenues précédemment.

La somme totale des réactions sera sur une panne :

$$2pbr \sin\alpha + 2blp \cos\alpha.$$

La pression verticale sera :

$$P = 2bpr\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4}\right) + 2blp \cos^2\alpha.$$

L'effort longitudinal de chaque côté sera :

$$P' = pbr \sin^2\alpha + 2blp \cos\alpha \sin\alpha.$$

Application. — Supposons $b = 200^{mm}$ $r = 50^{mm}$ $p = 10^{kg}$ par millimètre carré $\alpha = 45°$ $\sin \alpha = 0{,}707 = \cos \alpha$ $l = 40^{mm}$.

Somme des réactions sur une panne :

$$(2 \times 10 \times 200 \times 50 \times 0{,}707) + (2 \times 200 \times 40 \times 10 \times 0{,}707) = 141.400 + 112.000 = 253.400^{kg}.$$

Pression verticale

$$P = (2 \times 200 \times 10 \times 50\,(0{,}392 + 0{,}25) + (2 \times 200 \times 40 \times 10 \times 0{,}50) = 128.400 + 80.000 = 208.400^{kg}.$$

Effort longitudinal de chaque coté

$$P' = (10 \times 200 \times 50 \times 0{,}50) + (2 \times 200 \times 40 \times 10 \times 0{,}50) = 50.000 + 80.000 = 130.000^{kg}.$$

Ces chiffres montrent bien toute l'importance que peuvent prendre des faces planes raccordées à 45°. Le rayon de courbure r doit être proportionné à la pénétration de l'outil, laquelle est variable avec l'épaisseur de la pièce. Des outils à arrondir de petit rayon donnant lieu à un arc de contact supérieur à 90° tendent à trancher la pièce plutôt qu'à l'étirer.

Énergie dépensée pour l'étirage par pressions transversales. — L'énergie dépensée pour l'étirage d'un prisme par pressions transversales est une somme de travaux partiels correspondant aux divers coups des outils qui déplacent le métal sous des efforts tels que P, variables à chaque instant de l'opération et assez difficiles à estimer exactement avec des pannes convexes. Si l'on considère des outils à table plane *(fig. 55)*, et la déformation étant supposée régulière et prismatique, on peut déduire une relation du travail d'étirage en considérant les volumes de matière déplacés. $a, a' a''$ étant les trois côtés d'un prisme à section rectangulaire; l, l', l'', les variations respectives de ces côtés dans une déformation par pression ; R le coefficient de résistance du métal, le travail de déplacement des molécules peut être exprimé par

$$T = (aa'l'' + a'a''l + aa''l')\,R.$$

Si les deux variations l et l' sont de même sens, l'' sera

de sens contraire et le volume étant supposé invariable, on a

$$aa'l'' = a'a''l + a'a''l',$$

soit

$$aa''l = aa'l'' - a'a''l.$$

Il vient, en portant cette valeur dans l'expression du travail :

$$T = (aa'l'' + a'a''l + aa'l'' - a'a''l)\,R = 2aa'l''R.$$

L'énergie à dépenser pour produire la déformation est donc égale au double de l'énergie de l'un des travaux de déformation transversale.

Considérant le déplacement l'' produit par la force P supposée constante pendant la période élémentaire de compression, on aurait :

$$T = Pl'' = 2aa'l''R,$$

soit

$$P = 2aa'R,$$

ce qui permettrait de déduire R en fonction de P.

Ainsi que nous l'avons vu dans les essais de compression directe, la valeur de R est très variable pour un même métal aux différentes périodes d'une même compression.

On ne peut s'en tenir qu'à des approximations moyennes; le plus simple est d'opérer directement dans les conditions ordinaires de la pratique, soit, s'il s'agit d'un prisme de fer, en le chauffant à la couleur orange et le martelant jusqu'à une réduction de section voulue.

C'est ainsi qu'un tel prisme de section primitive carrée de $150^{mm} \times 150^{mm}$ et de longueur primitive égale à 450^{mm} battu par un marteau-pilon à vapeur à simple effet, à table plane, pesant 3.300^{kg}, et sous des chutes de hauteur constante égale à 1^{m}, a exigé 118 coups pour le réduire à une section de 85^{mm} de côté correspondant à une longueur de $1^{m},320$.

L'énergie dépensée a été :

$$T = 118 \times 3.300 \times 1,00 = 389.400^{kgm}.$$

L'opération a duré quatre minutes; la pièce était encore au rouge cerise.

Le métal déplacé de l'espace primitif est

$$85 \times 85(1.320 - 450) = 6285750^{mm3}.$$

de sorte que le déplacement d'un centimètre cube a exigé

$$\frac{389.400}{6.285,750} = 62^{kgm}.$$

En se servant de pannes arrondies, ce nombre serait beaucoup moins élevé.

En étirant par traction directe ledit prisme, et, en supposant un effort moyen rapporté à la section primitive de 6^{kg} par millimètre carré, l'énergie d'étirage supposé régulier serait :

$$(150 \times 150 \times 6)\,0,870 = 117.450^{kgm},$$

soit un rapport $$\frac{389.400}{117.450} = 3,3.$$

Ainsi l'étirage direct exigerait pour la pièce considérée un travail environ trois fois moindre que celui dépensé par le marteau.

Ce rapport est indiqué à titre de simple aperçu relatif ; mais il montre bien toute l'importance que présenterait le procédé de traction directe sur celui de percussions transversales répétées, si ce dernier n'avait le grand avantage de resserrer les molécules, d'améliorer le métal.

Engins employés pour l'étirage.

Pour étirer les pièces de petites dimensions, le forgeron utilise les divers marteaux à main ou à bras et la bigorne ronde de l'enclume ; il emploie aussi les petits marteaux mécaniques.

Pour les grosses pièces, les pilons à simple ou à double effet et les presses puissantes sont adoptés suivant la nature du métal et la destination de l'ébauche. Il convient, ordinairement, de commencer par le milieu du lingot en dirigeant les coups vers les extrémités et en ne donnant que vers la fin une section approchée de celle définitive, si celle-ci s'écarte de la section carrée ou octogonale.

L'étirage prononcé améliorant, dans la généralité des cas, les propriétés mécaniques des métaux, il convient d'adopter des pièces de section primitive S assez grande par rapport à

la section finale S′, particulièrement lorsque le métal provient d'éléments soudés en paquet.

Les rapports des sections $\frac{S}{S'}$ ou des longueurs $\frac{l'}{l}$ qui mesurent les rapports d'étirage varient de 3 à 6 pour les fortes pièces obtenues par fusion. Ces nombres sont beaucoup plus élevés pour les petites et moyennes pièces et pour celles en fer soudé. Un étirage prononcé a pour effet d'augmenter la ductilité et la limite d'élasticité, de réduire l'importance des défauts au centre des grosses pièces d'acier fondu, comme, par exemple, ceux qui proviennent de tapures. Poussé très loin, en épaisseur assez réduite, l'étirage fait acquérir aux métaux une structure fibreuse très favorable à la résistance à la traction.

Chassage.

Quelquefois, pour étirer, au lieu de la panne d'un marteau, on emploie *(figure 56)* un outil intermédiaire dit chasse ronde ou en V arrondi sur lequel on bat; le marteau est alors réduit au rôle d'engin mécanique.

Après avoir chassé la pièce sur deux ou sur quatre faces, il convient de rétablir la section carrée ou rectangulaire avec un marteau et une enclume à tables faiblement bombées et en contreforgeant. Il faut éviter la production des plissures à la surface.

Pour parachever la barre ou la pièce étirée, on la pare à la chasse à parer, ou chasse à table plane, que l'on humecte d'eau pour faciliter le dégagement des battitures.

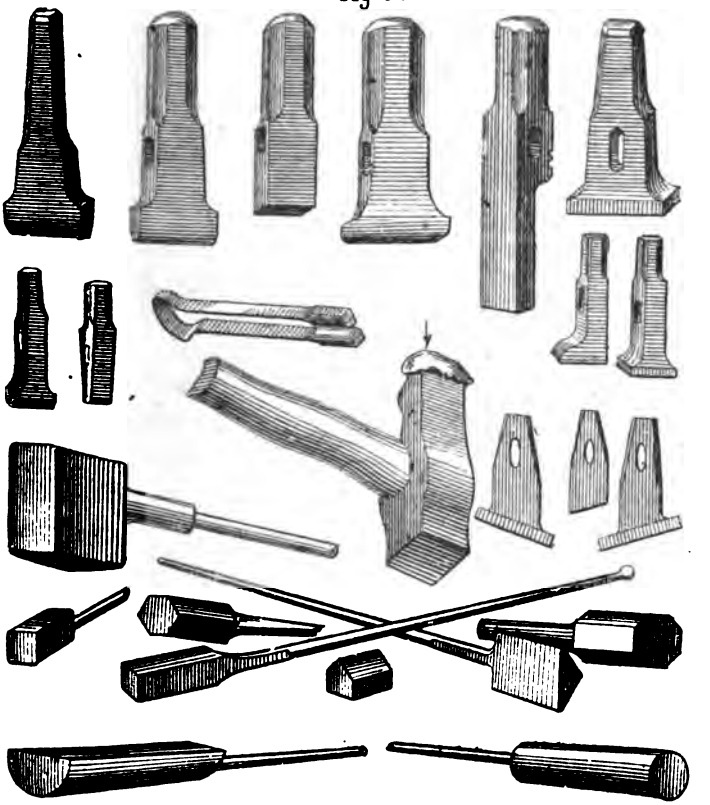
Pour la formation des chanfreins ou des faces obliques, les chasses sont à table inclinée à droite ou à gauche.

S'il s'agit de pratiquer des empreintes prismatiques hexagonales ou octogonales, les chasses ont la section voulue.

La chasse ronde est aussi employée pour former les congés, de même que la chasse carrée est utilisée pour dégager le métal à la suite des congés, ou pour aplatir le métal fortement en

produisant des pressions normales. On fait aussi usage des divers types de chasses ou mandrins de dimensions variables *(fig. 56)*.

Fig 56



Platinage.

L'étirage dit platinage est celui qui s'applique à de minces épaisseurs et à de grandes surfaces telles que l'étirage de petites tôles. L'allongement est obtenu avec un marteau à longue panne arrondie *(fig. 57)*, frappant la pièce sur toute sa largeur, des deux côtés, à tour de rôle, attendu que la déformation

étant inégale, la pièce se gondole, se courbe; les passes successives de chaque côté conservent autant que possible la forme

Fig 57. Pilon à platiner.

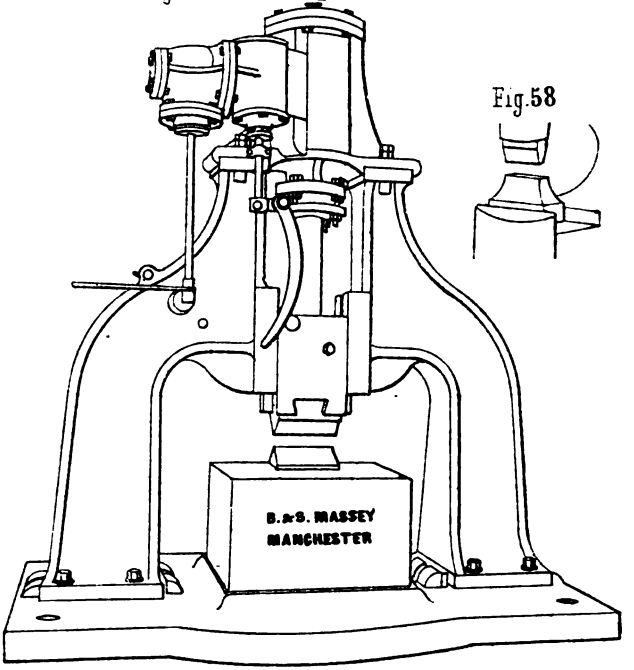


Fig.58

plane. Le marteau bat rapidement; le type automoteur à vapeur convient particulièrement pour le platinage.

Il faut opérer méthodiquement et, lorsque l'étirage est suffisant, la pièce est planée par un marteau à table plane sur enclume plate *(fig. 58)*.

Lorsqu'il s'agit de très minces épaisseurs, on opère sur un grand nombre de feuilles superposées ainsi que nous l'indiquerons au travail des tôles.

Le grand avantage du martelage en paquet réside dans la

possibilité de conserver plus longtemps une température élevée quand on opère à chaud et de faire usage d'une percussion plus puissante, dont le rendement est très supérieur à celle sur épaisseur réduite.

Planage.

Le planage a pour but de régulariser la surface d'une pièce étirée ou de toute pièce présentant des irrégularités de forme.

L'opération s'applique aux barres, tôles, aux pièces cylindriques, coniques, ou à des surfaces à double courbure telles que celles sphériques, toriques ou autres.

Les marteaux à planer sont à table plane ou légèrement bombée *(pl. XIV)*.

L'enclume, la bigorne ou le tas, saisi à l'étau ou placé sur chevalet, est de petite étendue, plane ou bombée, et de forme se prêtant au déplacement et à la mise en place faciles de la pièce.

Le planage à la main se fait pour petites pièces; mais, pour les moyennes et grandes pièces, il faut opérer au marteau mécanique battant de 200 à 500 coups par minute, suivant la force.

Le marteau à planer établi sur socle convient pour toutes pièces planes de moyennes dimensions; celui fixé à une poutre laisse libre tout l'espace autour de l'enclume.

Ceux contre mur sont utilisés pour les petites pièces. Celui à deux jambages est employé pour grandes pièces cylindriques ou autres, que l'on place sur chevalets à chariot. Le planage d'une pièce cylindrique doit se faire en martelant dans le sens circulaire et non pas suivant les génératrices; de même une plaque ou faisceau circulaire se plane circulairement à partir du centre et non suivant les rayons.

III. — Refoulage.

Le refoulage ordinaire consiste à renfler les dimensions transversales sur une partie de la longueur d'une pièce. Si on opère à froid, les parties non refoulées doivent être maintenues contre toute action de renflement; si l'opération se fait à chaud, ces parties doivent rester à température peu élevée, afin de localiser la déformation.

Quand la masse de la pièce est suffisante, il suffit de la laisser tomber sur un tas de fonte à fleur du sol, sinon, on emploie le marteau ou la presse.

Le renflement d'une extrémité s'obtient plus aisément qu'un renflement vers le milieu *(fig. 59 et 60)*. Pour peu que la longueur soit grande par rapport à la section, il se produit des flexions, il faut redresser la pièce à diverses reprises, le métal fatigue beaucoup, surtout s'il est fibreux.

A l'endroit du renflement, s'il est prononcé, les fibres s'écartent ou tendent à s'écarter, à se séparer, il se produit des arrachements latéraux, par suite des grands allongements superficiels de pourtour; il est nécessaire de battre transversalement pour assurer de nouveau l'homogénéité.

Il convient d'éviter le refoulage en adoptant des massiaux suffisamment forts en section, de manière à n'avoir à produire que de l'étirage.

Cependant, pour le soudage de certaines pièces, le refoulage combiné avec le martelage transversal est utile pour s'opposer à l'action d'étirage trop prononcé.

Dans certains cas, avec le chauffage électrique, les parties à renfler étant maintenues à haute température pendant toute la durée de l'opération, le procédé peut être avantageux pour former rapidement des bourrelets, des collets prononcés *(fig. 61 et 62)*.

Il convient aussi, pour raccourcir, mettre à longueur des

Fig.59

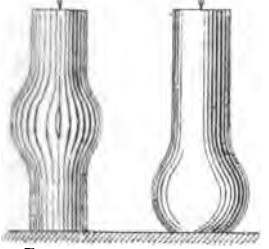


Fig.60

Fig 62

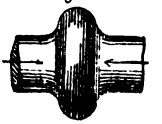


Fig.61

Fig.64

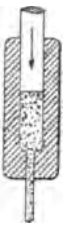


Fig.65

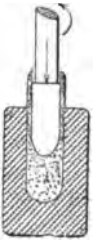


Fig 66

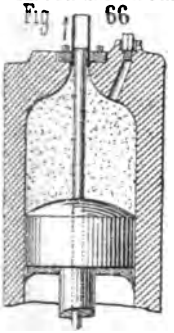
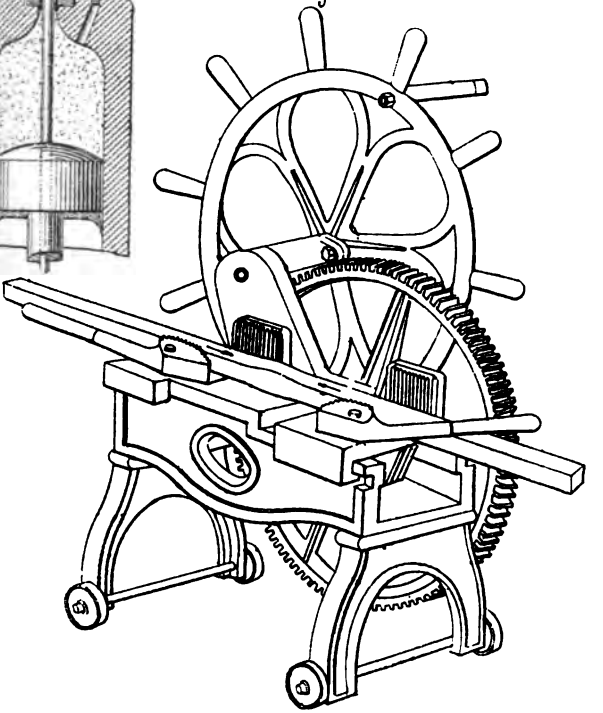


Fig.63



pièces un peu trop longues, comme par exemple : un bandage de roue, un essieu, une bielle. On emploie avantageusement, pour ces opérations, une presse telle que celle *(fig. 63)* dite machine à refouler.

Le refoulage est particulièrement appliqué pour la formation des têtes de pointes, clous, vis, boulons, rivets, etc. Ces têtes sont obtenues par refoulement progressif en plusieurs fois ou en une seule opération, soit à froid, soit à chaud. Pour bien serrer le métal, il faut un refoulement énergique, des pressions considérables qui varient avec la nature du métal et qui atteignent, par exemple, pour le fer à froid, plus de 100^{kg} par millimètre carré, et pour du fer à chaud, plus de 40^{kg}.

Une application importante est encore celle qui consiste à refouler le métal à l'état liquide, pâteux ou solide, contenu dans un récipient, pour le faire écouler à travers un orifice de manière à donner à la pièce la section qui correspond à celle de l'orifice *(fig. 64)*. Depuis longtemps (1), ce procédé est employé à la fabrication des tuyaux de plomb, d'étain, en refoulant le métal *(fig. 66)* par une pression hydraulique. On a essayé de l'appliquer à l'acier et au fer fondu, en vue d'obtenir des barres simples ou profilées, ébauchées au plus près de leur section finale, afin d'être achevées par quelques passages dans un laminoir finisseur. Le métal en fusion, contenu dans un récipient réfractaire, est refoulé au moyen de l'acide carbonique liquide permettant de produire des pressions de 40^{kg} et plus par centimètre carré. Le métal est parfois refoulé autour de la tige de pression *(fig. 65)*, l'écoulement se faisant ainsi latéralement. Il faut des pressions énergiques très variables suivant les dimensions relatives, suivant que l'extrémité de l'outil est plane, ou arrondie, ou pointue, suivant que l'on donne ou non un mouvement de rotation relatif à la matrice et au mandrin en même temps que le mouvement longitudinal.

(1) Thomas Burr, en Angleterre, prenait une patente le 11 avril 1820 pour l'application de ce procédé.

Essais de refoulage avec mandrin et matrice.

Signalons quelques essais faits avec du plomb et dont les efforts de pénétration sont indiqués par les courbes de la *figure 67*.

Les courbes AA'A"A‴ se rapportent au refoulage du métal par un mandrin de 36^{mm} de diamètre à travers des trous dont les diamètres étaient $6^{mm},4$, 12, 15, 20^{mm}. La vitesse du mandrin était moyennement de 2^{mm} par minute. Les premiers millimètres de déplacement correspondent à une période de compression du plomb, puis l'écoulement commence et la pression de régime ne varie plus que dans de faibles limites.

Les pressions maxima et les résistances d'écoulement rapportées à la section du mandrin égale à 1029^{mm2} sont :

Diamètre du trou .	$6^{mm},4$	12^{mm}	15^{mm}	20^{mm}
Pressions maxima .	25.100^{kg}	19.000^{kg}	14.200^{kg}	9.900^{kg}
Résistances unitaires	$24^{kg},4$	$18^{kg},5$	$13^{kg},8$	$9^{kg},6$

Ces valeurs font ressortir l'influence du diamètre du trou d'écoulement et si on rapporte les maxima des efforts en ordonnées et les sections des trous en abscisses on trouve la courbe A_1.

Dans le premier essai, l'énergie de refoulage pendant la période de régime pour déplacer le mandrin de 1^{mm} est de $25.100 \times 0,001 = 25,1^{kgm}$, ce qui correspond à un volume transformé de $0,001029 \times 0,001 = 0,000001029$, de sorte que, pour refouler un décimètre cube de métal dans les mêmes conditions, il faudrait $\frac{0,001 \times 25,1}{0,000001029} = 24.390^{kgm}$ dépensés à raison de 50,2 par minute ou de 0,83 par seconde.

La courbe B est relative à la pénétration d'un mandrin de 45^{mm} de diamètre à about plan dans une matrice remplie de plomb, de $52,4^{mm}$ de diamètre. La pression par millimètre carré de section du mandrin varie de 6 à $8,7^{kg}$ dans la période

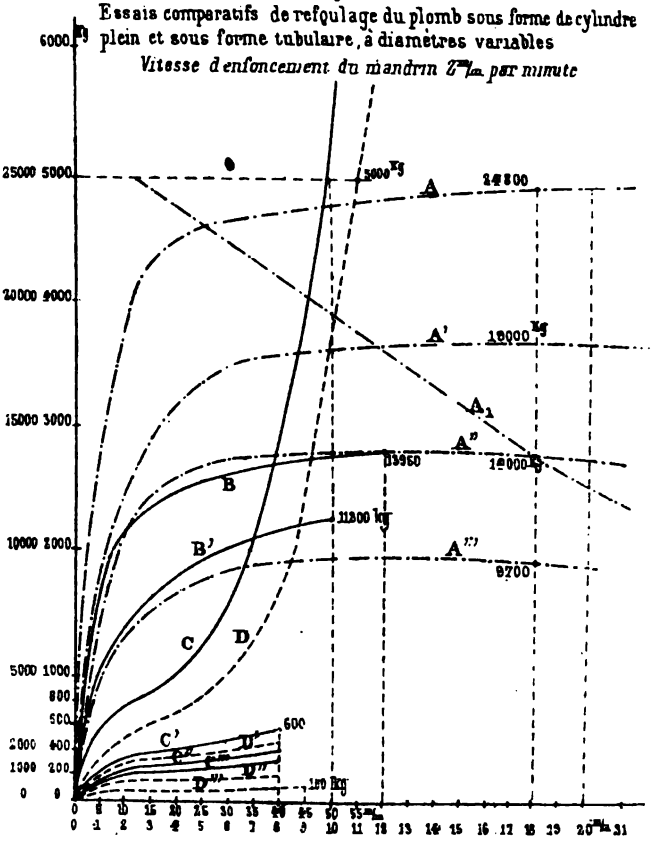
qui correspond à l'écoulement annulaire, et de 17 à 24^{kg} par millimètre carré de section annulaire.

Avec un mandrin de 34^{mm} de diamètre, et la même matrice

Fig 67

Essais comparatifs de refoulage du plomb sous forme de cylindre plein et sous forme tubulaire, à diamètres variables

Vitesse d'enfoncement du mandrin 2^{mm} par minute



de 52^{mm},4, on obtient la courbe B' et les efforts par millimètre carré varient respectivement de 5^{kg},5 à 12^{kg},5 et de 4 à 9^{kg}.

On conçoit que ces efforts, ainsi rapportés, peuvent être très

variables et qu'ils dépendent des rapports des sections de la matrice et du mandrin.

En effet, si d est le diamètre de la matrice, d' le diamètre du mandrin, P l'effort de refoulement, R la résistance rapportée à la section annulaire, R′ la résistance rapportée à la section du mandrin, on a: $R = \frac{4P}{\pi(d^2 - d'^2)}$ $\quad R' = \frac{4P}{\pi d'^2}$

soit: $$\frac{R}{R'} = \frac{d'^2}{d^2 - d'^2} = \frac{1}{\frac{d^2}{d'^2} - 1}.$$

On voit que pour $d = d'$ R tend à prendre une valeur infinie.

Pour d' petit, l'effet utile, la déformation que l'on recherche est très limitée. Il convient d'adopter un rapport $\frac{d^2}{d'^2}$ compris entre 1,2 et 3. Pour $\frac{d^2}{d'^2} = 2$, $R = R'$, ce qui correspond à une section de mandrin égale à la section annulaire, soit $d = d'\sqrt{2} = 1{,}4d'$.

Ces dernières valeurs sont consacrées par la bonne pratique pour les manchons ébauches des tubes en acier doux que l'on refoule à haute température et que l'on étire ensuite.

Lorsqu'on donne aux outils un mouvement de rotation relatif, soit généralement en faisant tourner le mandrin, les efforts de pénétration diminuent beaucoup avec la vitesse. Le mouvement détermine moins de frottement dans le sens longitudinal sur le mandrin et la pièce; le métal s'échauffe et présente une moindre résistance.

Nous avons opéré sur du plomb avec une matrice de 30^{mm} de diamètre et un mandrin de 15^{mm} de diamètre. Les vitesses ont été de 0, 74, 128, 200 tours par minute.

Avec un mandrin à about plan, la pression sans rotation de l'outil a varié de 5 à 40^{kg} et plus suivant le degré d'enfoncement, cette pression étant rapportée à la section du mandrin.

La variation des efforts est représentée par la courbe C. Aux vitesses indiquées on obtient les courbes C'C''C''' dont les ordonnées sont beaucoup plus faibles à mesure que la vitesse augmente. Ainsi à la pénétration de 35mm les efforts sont :

Nombre de tours	0	74	128	200 tours
Efforts	2100	580	730	260kg

Lorsque l'outil est arrondi, présente, par exemple, la forme d'une demi-sphère, les efforts sont moindres.

Les courbes DD'D'D'' se rapportent à ce type de mandrin.

Nous pourrions signaler différentes remarques très curieuses sur ces essais, mais cela nous entraînerait trop loin. Notons seulement qu'au début de la pénétration d'un mandrin rotatif, il se forme un bourrelet tout autour de l'outil; ce n'est qu'après un certain enfoncement que le métal s'écoule annulairement. On constate que vers le contact de l'outil, le métal est fortement échauffé; si la vitesse est grande, le plomb fond. Le métal avoisinant l'outil est excessivement travaillé en hélice, ce qui peut nuire à la qualité d'un métal ne présentant pas l'extrême ductilité du plomb. C'est pourquoi on préfère, pour les fortes ébauches en acier doux, supprimer la rotation qui, de plus, nécessite une dépense d'énergie due aux frottements, favorable, il est vrai, à la conservation de la haute température, mais beaucoup plus élevée que celle absorbée par le refoulage sans rotation. En opérant à une température voisine de 1200°, la résistance par millimètre carré de section du mandrin, lorsque la section annulaire est égale à la section du mandrin, peut varier, d'après M. Robertson, entre 30 à 40kg, soit de quatre à six fois plus que la résistance du plomb à froid. Ce procédé est appliqué pour le cuivre et le laiton à froid en donnant au mandrin une vitesse circonférentielle de 0,10. Pour l'acier doux à haute température, particulièrement quand la pièce est de faibles dimensions, il faut opérer très rapidement, le mandrin dont le diamètre varie de 12 à 25mm tourne à une

vitesse de 10.000 à 20.000 tours par minute, la vitesse de pénétration étant d'environ 0,004.

Nous signalons, dans la deuxième partie, la plupart des dispositions des mandrins et machines adoptés par M. Robertson pour l'application du procédé de refoulage à l'obtention des ébauches des tubes.

IV. — Mandrinage.

Le mandrinage consiste à régulariser une pièce, en obligeant le métal à épouser la forme de l'outil appelé *mandrin*, dont les surfaces d'action agissent généralement par pressions latérales.

S'il s'agit de mandriner un profil extérieur, le mandrin M *(fig. 68)* emboîte la pièce P qui passe à travers. La section de la pièce étant légèrement supérieure à l'ouverture de l'outil, le métal se moule et prend la section de passage. La pièce et le mandrin ont un mouvement relatif rectiligne produit par le marteau ou par une presse. Il se développe, au contact des surfaces de passage, un frottement plus ou moins énergique dû aux réactions P′ que l'on peut estimer, si l'on connaît l'effort P et le coefficient de frottement f, par la relation $Spf = P'f = P$ (p est la pression ou réaction par unité de surface S).

Les réactions sont d'autant plus grandes que les surfaces S de contact sont plus développées; il convient de ne pas les exagérer pour ne pas augmenter P outre mesure. On suppose qu'il n'y a pas de refoulement sensible du métal, autrement les relations d'équilibre devraient en tenir compte, comme il sera indiqué au mandrinage par traction.

S'il faut mandriner une pièce creuse, un trou, c'est le mandrin qui est emboîté *(fig. 69)*.

Les mandrins ordinaires *(fig. 70)* se font en acier ou en fonte dure pour les grosses dimensions. On opère à froid ou à chaud suivant la nature et l'importance des pièces.

Le mandrin est parfois extensible *(fig. 71)*, constitué par plusieurs pièces B adaptées sur une pièce conique c et maintenues par des pièces E, F, de manière qu'une vis G permette de régler à volonté, dans une faible limite, le diamètre extérieur du mandrin dont l'application consiste souvent à étendre, mandriner l'extrémité d'un tube pour l'agrandir, le forcer à épouser la pièce qui l'emboîte, opération souvent désignée sous le nom de *tubage*, de *sertissage*.

On a soin de donner au mandrin un mouvement de rotation pour qu'il exerce son effet convenablement.

Les *figures 72-73* se rapportent à un mandrin extensible (1) dont les parties B qui s'écartent sont articulées.

L'écrou E de la tige filetée C se déplace à volonté longitudinalement et permet de régler le diamètre extérieur. Le mandrin *(fig. 74)* est une disposition adoptée pour les grandes viroles, les bandages que l'on mandrine à chaud. Après réglage du coin C au moyen de la vis V, on fait agir une presse hydraulique.

Les *figures 79* et *80* représentent le mandrin de Tully à huit galets E logés dans les parois du corps de mandrin B et s'appuyant contre trois pièces D dont l'écartement est obtenu par la tige conique C actionnée par une vis V. La *figure 81* indique la disposition adoptée par Faivre. La *figure 78* se rapporte au mandrin très répandu de Richard Dudgeon.

Lorsque la pièce est creuse et qu'il faut régulariser les deux surfaces intérieure et extérieure, comme par exemple dans le cas d'un tuyau, on fait usage de deux mandrins M et M' *(fig. 82)* agissant simultanément sur la pièce P.

Afin de pouvoir, à volonté, mandriner l'extérieur ou l'intérieur des tubes, le mandrin présente la disposition *(fig. 75, 76, 77)* comprenant quatre galets saillants à l'extérieur et à l'intérieur de leur monture (2).

(1) Mandrin de Hall et Thompson.
(2) Mandrin de W. Bond (Londres), brevet du 7 septembre 1880.

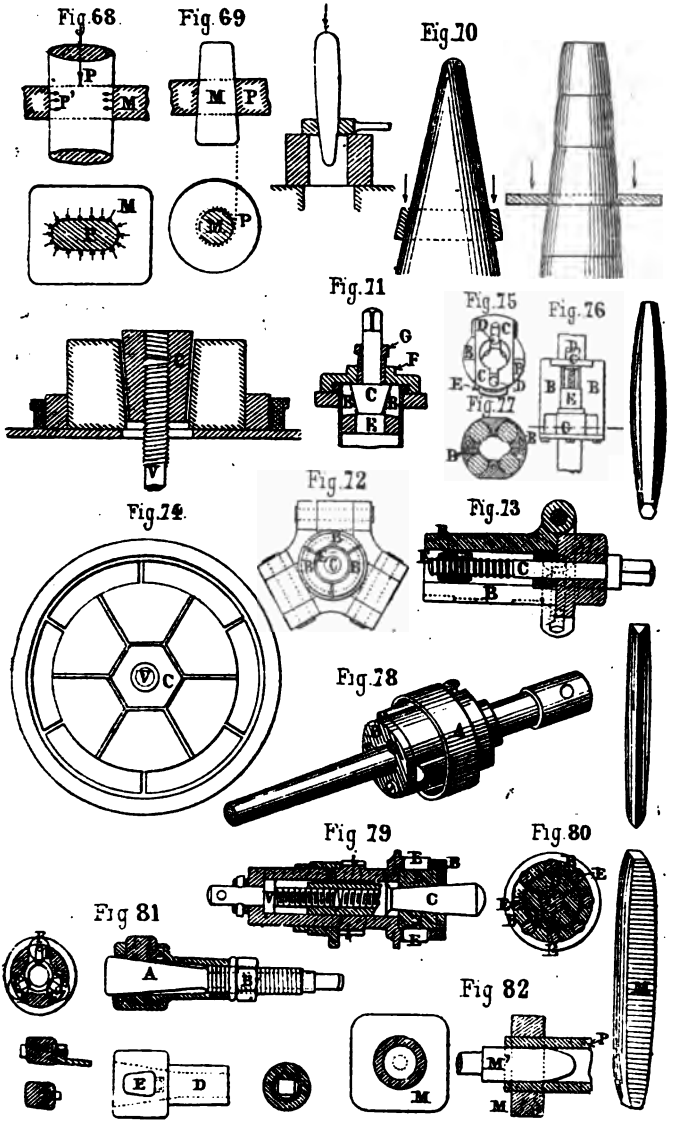


Fig.68
P
P'
M
M
Fig.69
M
P
M
P
Fig.70
Fig.71
G
F
C
E
V
Fig.72
Fig.73
C
B
Fig.74
V
C
Fig.75
Fig.76
Fig.77
Fig.78
Fig.79
E
C
Fig.80
Fig.81
A
B
E
D
Fig.82
M
M'
P
M

Le mandrinage s'applique encore à froid à des pièces cylindriques creuses que l'on emboîte dans des matrices empêchant la pièce de se dilater lorsqu'on emmanche à force, à l'intérieur, des mandrins dont les dimensions croissent progressivement.

Le métal intérieur est ainsi fortement refoulé; il acquiert une plus grande dureté, les molécules sont plus serrées et les couches intérieures sont dans un état de compression très favorable pour supporter ultérieurement des efforts de tension.

Ce procédé a été appliqué à l'arsenal de Vienne par le général Uchatius pour la fabrication des canons de bronze; il a ainsi réussi à donner au bronze une ténacité et une dureté comparables à celles des bouches à feu en acier. Il n'est pas douteux que la limite d'élasticité s'élève, mais la ductilité diminue.

L'opération est aussi adoptée pour les frettes de canons en bronze ou en acier doux. Le mandrinage est dans ce cas un procédé de compression à froid.

V. — Étampage. Matriçage.

En vue de faciliter l'exécution des pièces dont la forme peut être partiellement ou totalement enveloppée sans difficulté, on fait usage de moules qui, recevant l'action d'une pression continue ou alternative, ou d'une percussion répétée, donnent au métal la forme correspondant aux empreintes ou creux du moule constituant ainsi l'outil, la tête de presse ou le mouton n'ayant pour rôle que d'exercer l'effort, de transmettre l'énergie qu'exige le façonnage.

La pratique distingue deux variétés de travail en formes dont les éléments se déplacent en ligne droite par pression ou par percussion simple. Ce sont: l'étampage (1), le matriçage. Les

(1) Au siècle dernier, on désignait aussi l'opération de perçage ou de poinçonnage par le mot étampage. Le trou dit étampure, étant une forme spéciale obtenue par des outils de forme dits étampes, peut rentrer dans la catégorie générale. Cependant nous indiquerons dans un article particulier la formation des trous.

outils sont désignés sous les noms d'étampes ou de matrices; ils ne diffèrent entre eux que par quelques dispositions particulières. Ainsi, les étampes n'emboîtent que partiellement la pièce, tandis que les matrices sont supposées emboîter complètement la pièce. L'opération se fait en une ou plusieurs paires de moules façonnant l'objet d'un seul coup ou graduellement.

Nous retrouverons plus loin une variété du procédé de matriçage, dans l'estampage, l'emboutissage, et aussi dans le laminage de pièces de formes particulières, avec des rouleaux ou cylindres à empreintes.

Les étampes ordinaires sont utilisées pour achever les pièces de forme prismatique ou cylindrique. Elles comprennent *(fig. 1, 2, 3* et *4, pl. XV)* deux parties : l'une, dite sous-étampe ou de dessous, l'autre dite contre-étampe ou de dessus.

La sous-étampe est placée sur l'enclume ou constitue un tas dit tas de forge *(fig. 5* et *6)* présentant des gorges ou empreintes constituant ainsi une série de sous-étampes.

C'est sur la contre-étampe que s'exerce la pression ou la percussion qui se transmet sur les différentes faces de la pièce et dont l'action est, par suite de l'emboîtement de pourtour, très favorable au déplacement longitudinal, tout en conservant une section régulière.

On conçoit que, pour une section carrée, il convient d'adopter la forme en V pour les étampes, la dépouille ou inclinaison des faces facilitant le dégagement de la pièce et des outils. De plus, avec des étampes sur plat ou à faces horizontales et verticales employées pour achever au plus près, avec des contre-étampes plates *(fig. 3)*, la pression sur les faces verticales est plus faible que sur les autres, tandis qu'avec les étampes en V *(fig. 7)*, la pression est uniformément répartie sur les quatre faces. Ainsi que nous l'avons vu précédemment, les pressions totales sont augmentées pour un même effort vertical.

Remarquons que l'effort P *(fig. 7)* donne lieu à des efforts totaux égaux à $4P' = \frac{4P}{\sqrt{2}} = 2{,}8P$.

Malgré l'augmentation sensible de la pression totale sur les quatre faces, l'étampage n'est pas avantageux pour l'étirage, parce que les pressions agissent toutes normalement à la longueur. L'étampage convient mieux pour achever les pièces.

En donnant aux faces des étampes des surfaces courbes *(fig. 8)*, il se développerait des pressions obliques à la longueur, et l'étirage serait alors plus prononcé.

Parfois, dans le cas d'étirage, on supprime l'étampe supérieure, le marteau frappe directement sur la pièce *(fig. 9)*; le métal reçoit ainsi trois pressions P, P', P'' dont la valeur

$$P' = \frac{P}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}.$$

Si l'angle $\alpha = 60°$ $\quad P' = P$.

Les étampes hexagonales *(fig. 12)* sont ordinairement employées pour achever les têtes de boulons, les écrous de cette forme. Il va sans dire que la pièce est souvent retournée pour éviter les bavures au joint des étampes et obtenir plus de régularité. Les étampes à cannelures *(fig. 4)* sont utilisées pour pièces de forme correspondante présentant souvent une face plane sur laquelle agit la contre-étampe ou chasse-plane. Ces étampes à moulures étaient autrefois très employées en ferronnerie pour le façonnage des barres profilées.

Lorsque la section est cylindrique, l'étampage est employé pour l'achèvement des pièces. La section circulaire ne convient pas pour un étirage prononcé; les effets des déplacements latéraux sont toujours très élevés. Ils se remarquent tout particulièrement avec des outils à tables planes *(fig. 13* et *14)*. Les molécules avoisinant les génératrices supérieures et inférieures, ou d'action des outils, sont refoulées vers le milieu et déter-

minent un renflement exagéré des parties de pourtour libres qui se criquent, se fendent longitudinalement ou tendent à former des prismes de glissement analogues à ceux que l'on constate avec des matières à texture grenue non malléables. D'ailleurs, les déformations successives accuseraient sur tout le pourtour des faces multiples à directions tordues et le travail serait difficile à conduire. De plus, les molécules centrales comprimées et tractionnées alternativement sont sollicitées à se déplacer dans tous sens par entraînement des parties latérales, il se produit une tendance à faire le vide au centre, où précisément les raccourcissements et allongements relatifs sont les plus importants et entraînent la rupture ou déchirure centrale pour peu que ces actions se répètent.

Si on considère un cylindre central de petit diamètre *(fig. 13)*: dans une première déformation il se transforme en cylindre à base ovale, puis dans la déformation suivante *(fig. 14)*, le petit axe de l'ovale devient le grand axe subissant un allongement d'environ 100 0/0 que peu de métaux peuvent supporter même dans leurs états de plus grande ductilité (1).

On ne saurait donc forger une pièce cylindrique en battant à forts coups; les déformations conduiraient à battre au carré comme cela s'impose pour le dégrossissage, et c'est seulement vers la fin de l'opération que l'on transforme la section carrée en huit, seize, trente-deux pans, pour ensuite l'étamper au rond.

Cependant, pour un étirage modéré de grosses pièces parfois creuses, forgées sur mandrin intérieur *(fig. 16)*, l'étampe est employée avantageusement si elle enserre la pièce sur la plus grande partie de son pourtour, de manière à forcer le métal à se déplacer dans la seule direction libre, la direction longitudinale. Lorsque l'action de l'outil est localisée, le mandrin

(1) Ces observations seront reprises de plus près dans le procédé de roulage.

intérieur sert d'enclume pour ainsi dire aux deux étampes, le métal se déplace circulairement, l'étirage est alors peu sensible en longueur.

Un effet analogue se produit avec une pièce cylindrique emboîtée à force sur une autre formant mandrin. Il est possible de supprimer leur adhérence par un battage qui augmente la longueur dans le sens circulaire sans augmenter la longueur.

Dans une étampe semi-cylindrique *(fig. 15)*, les pressions sont maxima suivant le diamètre vertical et se réduiraient à une valeur nulle vers le diamètre horizontal si les étampes ne s'opposaient pas aux déplacements latéraux.

La forme cylindrique étant de moindre surface que les formes prismatiques pour un même volume, devrait être adoptée de préférence quand on opère à chaud, si on pouvait répartir les pressions uniformément sur toute la surface de pourtour ou tout au moins sur une grande partie de cette surface, soit par la combinaison de quatre étampes agissant simultanément. Ordinairement, on adopte des étampes en V telles que celles *(fig. 17)* à angle de 135° forgeant sur huit pans et l'on achève soit avec l'étampe *(fig. 18)*, soit avec celles *figure 15*.

Les étampes cylindriques sont souvent utilisées pour achever en une chaude des petites pièces, telles qu'une poignée, un petit arbre *(fig. 25)*, présentant souvent des épaulements, des collets. Ces étampes comportent, pour les petites dimensions, plusieurs cannelures décroissantes *(fig. 19)*.

Les étampes à manches formant ressort à pincettes *(fig. 21-22)* assurent la parfaite superposition des deux parties et servent à dégorger, épauler.

On fait aussi usage d'étampes pour parties sphériques, pour formes de révolution ou autres lorsqu'il faut exécuter un grand nombre de pièces identiques (voir *fig. 23* et *24*).

L'étampage est encore appliqué pour façonner les abouts ou têtes de boulons, rivets, chevilles, crampons, etc. On a essayé aussi de l'utiliser pour la formation des vis à chaud, les étampes

étant dans ce cas deux parties formant chacune un demi-écrou agissant à plusieurs reprises pendant que l'on déplace la tige à fileter. Quantité de pièces de ferronnerie, de taillanderie, etc., sont ébauchées ou achevées par étampage en bout, en procédant progressivement dans plusieurs paires d'étampes qui prennent alors le nom de matrices ouvertes, parce qu'elles n'emboîtent pas complètement la pièce.

Si les pièces comportent des trous de petit diamètre, il est préférable de faire venir de forge la pièce pleine, à moins, cependant, que les pièces se répètent un grand nombre de fois. Les grosses pièces telles que les frettes, les tubes à canons, les pots de presse en acier sont évidées avant l'étampage qui les achève. De cette manière, le métal intérieur est mieux forgé, acquiert plus d'homogénéité.

L'étampage transversal des petites pièces qui se répètent se fait rapidement avec des machines spéciales à étamper ou des pilons à grande vitesse *(planche XVI)*.

La *figure 1* se rapporte à une machine manœuvrée à la main ; c'est une sorte de presse à vis et levier-balancier, dont l'outil inférieur est placé sur une tablette du bâti ; l'étampe supérieure est fixée sur un levier oscillant, actionné par la vis. On peut régler à volonté l'épaisseur à étamper par un simple coin d'arrêt.

Les *figures 2* et *3* sont des forgeuses-presses à excentriques commandant des tiges porte-étampes supérieures à course fixe ; les étampes inférieures se règlent en hauteur à volonté, ce qui permet également d'obtenir avec sûreté des épaisseurs ou diamètres réguliers.

Ces machines ont des vitesses atteignant jusqu'à 800 tours par minute ; le travail est donc très rapide. Pour une série de pièces à forger, identiques, on peut employer successivement quatre paires d'outils avec la machine *(fig. 3)* ; chaque paire correspondant à une opération.

Le pilon *(fig. 4)* n'offre rien de particulier à signaler ; on peut y adapter à volonté des outils pour étampage en bout.

Le matriçage, proprement dit, se fait en matrices dites fermées exerçant leur action sur toute la surface de la pièce. Elles présentent en creux la forme enveloppe de l'ébauche ou de la pièce, suivant que cette dernière est obtenue en plusieurs ou en une opération.

Le moule comporte ordinairement deux matrices dont les empreintes sont en dépouille pour permettre ou faciliter le dématriçage *(fig. 26, pl. XV)*. L'opération se fait à chaud s'il s'agit de fer, d'acier, de cuivre, et si les reliefs sont prononcés, tels que ceux des organes de machines. Elle se fait à froid pour les pièces de cuivre, de fer doux, de plomb, de zinc, à faibles reliefs, tels que ceux de certaines pièces de quincaillerie, de taillanderie, de ferronnerie.

Exceptionnellement le matriçage s'effectue à froid pour quelques pièces de machines de dimensions restreintes auxquelles on veut donner une grande dureté superficielle en opérant sur un métal relativement malléable.

Depuis quelques années, le matriçage du fer fondu à l'état liquide a été essayé pour les grosses pièces, mais n'est pas encore entré dans la pratique courante.

L'une des matrices est ordinairement fixe, celle de dessous, qui repose sur le tas ou sur la chabotte de l'engin mécanique; l'autre matrice est mobile, le plus souvent verticalement, et reçoit l'action d'un mouton ou la pression d'une presse. Le plan de joint des matrices est rectangulaire avec la direction de l'effort. La disposition horizontale du plan de joint est commode pour les manœuvres et la tenue des pièces; la percussion plus ou moins répétée est souvent préférée à la pression continue, qui doit être très énergique et agir très rapidement pour que le métal, si on opère à chaud, ne se refroidisse pas trop au contact des matrices avant la fin de l'opération.

Il convient toujours de donner un excès d'intensité à l'effort

afin de resserrer fortement le métal et de le comprimer dans toutes les parties de la pièce.

Dans le cas de la presse, la compression par millimètre carré doit être au moins de 4^{kg} sur le fer ou l'acier porté à la température soudante. Cette pression doit être plus élevée dès que la température s'abaisse. Il convient de la porter à 10, 15^{kg} et souvent plus pour assurer l'homogénéité du métal, obtenir des surfaces nettes.

Pour une surface d'action de 1^{m2}, il faudrait une force de $10.000.000^{kg}$, c'est-à-dire une presse de grande puissance, en supposant une pression de 10^{kg} par millimètre carré. Comme le déplacement de la matrice mobile est petit, le travail mécanique est relativement peu élevé; l'emploi d'un accumulateur est avantageux, afin de produire un coup de bélier.

Généralement, on matrice au pilon, la compression se fait rapidement; le métal, étant au maximum de malléabilité, offre le minimum de résistance au déplacement des molécules; le métal remplit bien le moule sans arrachements, sans criques.

Il faut des moutons à grande masse relative donnant un coup énergique tel que le métal, de couleur orange avant le choc, redevienne blanc après le choc, l'énergie en excès se retrouvant partiellement en élévation de température, ce que l'on ne saurait obtenir à la presse.

Il faut réduire le plus possible la bavure du joint, en adoptant un volume peu différent de celui de la pièce, soit un poids d'ébauche égal à 1,2 de celui de la pièce.

Dans la construction des matrices, qui doit être très soignée, on tient compte d'un retrait variable avec la température finale, et évalué pour le fer à $\frac{1}{84}$ pour la longueur; $\frac{1}{42}$ pour la surface; $\frac{1}{28}$ pour le volume (1).

(1) *Bulletin technologique*, juillet 1888 : *Matriçage des pièces en fer*, par F. Ayrolles.

Le poids varie suivant les dimensions et les formes des pièces. Il faut assurer une grande résistance à la déformation et au choc. Les matrices actionnées à la presse peuvent être moins solides que celles pilonnées. Dans ce dernier cas, le poids a une certaine influence; la pratique le prend égal de vingt à cinquante fois celui de la pièce. Elles se font en acier fondu ou en fonte aciéreuse.

Les matrices doivent être bien maintenues et guidées, soit par un emboîtement partiel latéral dans des pièces *ad hoc*, soit par des goujons de gros diamètre s'engageant dans des trous correspondants *(fig. 27* et *28)*.

Lorsque la pièce comprend une surface plane, il convient de former l'empreinte, si possible, entièrement dans la matrice inférieure, de sorte que la matrice supérieure soit simple, ne comporte qu'une surface plane, ce qui permet de se servir d'une tête ordinaire de la presse ou du pilon.

Les ébauches doivent être préparées au plus près possible et quelquefois les pièces de formes complexes exigent plusieurs couples de matrices, le matriçage étant partiel et successif. Les bavures de certaines pièces sont enlevées dans des matrices spéciales dites ébarbeuses.

L'action de l'outil se produisant avec plus d'intensité sur la partie supérieure, principalement dans le cas de percussion, il convient de ménager les angles vifs de ce côté plutôt que de l'autre.

Parfois, en vue d'éviter le remplacement de la matrice, les parties de grande fatigue sont rapportées, elles sont en acier dur et fixées *(fig. 29)* par des vis. Il convient aussi de consolider les matrices par des frettes solides.

Le matriçage est appliqué à toutes pièces de machines, de ferronnerie, etc., petites ou grosses. Comme pour l'étampage, afin de simplifier la construction des matrices et les opérations, et aussi de ne pas déterminer des défauts par le perçage de trous ou d'évidements, on préfère souvent faire venir les pièces pleines. Ainsi les gros arbres coudés ont leurs vilebrequins

pris dans la masse; ils sont dégagés à la tranche ou à la scie à chaud. Les évidements des têtes de bielles, les trous des manivelles motrices sont aujourd'hui facilement exécutés dans la masse au moyen des fraiseuses, mortaiseuses, perceuses.

Cependant, lorsque les pièces se répètent en grand nombre, comme par exemple les roues de wagons, le trou du moyeu vient de forge et de matriçage; on économise la matière, et le métal du moyeu est ainsi plus fortement refoulé, comprimé, serré. Les procédés de matriçage ont pris une grande importance, se sont très développés depuis trente ans; ils conduisent à une économie sérieuse sur le prix de revient et permettent d'obtenir rapidement de nombreuses pièces identiques. D'ailleurs, au point de vue industriel, les procédés d'étampage et de matriçage, en raison de l'outillage spécial qu'ils nécessitent, ne sauraient s'appliquer avantageusement que si le nombre des pièces est élevé.

Engins de matriçage et d'étampage en bout.

Le matriçage, l'étampage en bout des petites pièces ont donné lieu à l'emploi de moutons, de marteaux, de presses disposées spécialement en vue des applications de ces procédés.

La presse à vis dite balancier *(fig. 1, pl. XVII)*, actionnée mécaniquement, est un outil relativement puissant, se prêtant à la confection rapide, par un seul coup, de toutes pièces courantes.

La matrice ou étampe inférieure est solidement maintenue sur le socle du bâti; la matrice supérieure est libre ou fixée sur le plongeur dont l'énergie provient du plateau monté sur la vis, plateau possédant une certaine vitesse, une certaine puissance vive qui se dépense brusquement sur les outils, par l'intermédiaire de la vis.

Les simples moutons à corde, à chaîne et poulie de renvoi, ou à courroie et commande mécanique *(fig. 2 et 3)* sont employés dans la fabrication des pièces simples.

Les pilons ne présentent de particulier que les dispositions

des tas et frappes qui s'assemblent avec les matrices ou restent indépendants. La matrice inférieure est réglable avec des vis *(fig. 4)*.

A l'action brusque du marteau-pilon, il est parfois préférable de substituer l'action plus lente, mais néanmoins rapide, d'une pression progressive.

Les matrices en acier, nécessaires pour le marteau, peuvent être en fonte pour la presse.

La presse donne, si elle est puissante, des pièces plus régulières, plus achevées, le métal ayant subi des pressions qui se répartissent mieux que celles produites par le choc.

En vue du travail des moyennes pièces, on a établi des presses actionnées par la vapeur afin d'opérer plus rapidement qu'avec l'eau.

La *figure 5* (1) se rapporte à une presse comportant deux cylindres dans lesquels la vapeur peut agir simultanément ou d'une façon indépendante. Les deux cylindres A, B reçoivent des pistons de très faible course. Sur le piston supérieur est placée la table porte-matrice T. Le piston inférieur est relié au premier par une forte tige C. Des robinets permettent d'admettre la vapeur à volonté dans l'un ou dans les deux cylindres.

La deuxième matrice M est fixée sur le sommier de presse S.

L'opération se faisant avec une rapidité relative, il y a un certain choc au commencement du contact des outils avec le métal. Puis la pression s'exerce en tous les points et on la maintient le temps jugé convenable suivant le genre de pièce.

Les pistons reviennent d'eux-mêmes à leur position inférieure, dès que la vapeur s'échappe. Les pistons ont un diamètre de $1^{m},250$; la pression de la vapeur variant de 5 à 10^{kg}, on peut produire un effort de 100 à 200^{t}.

Lorsqu'il s'agit de souder en matrice un certain nombre de pièces entre elles, on peut répéter les coups à raison de vingt

(1) Presse modèle Massey.

par minute, la presse a alors une complète analogie avec le pilon-vapeur.

La course maximum du tablier est de $0^m,38$; il peut être écarté du sommier de $0^m,60$.

Des presses analogues sont employées pour les petites pièces telles que leviers, bouchons de trous d'homme, fonds de cylindres en acier, clés à écrous, manettes, etc. C'est avec des presses de ce genre que MM. Massey matricent les montants, les plaques de fondation en acier, de leurs divers marteaux-pilons.

Nous signalerons encore la presse employée, il y a une vingtaine d'années déjà, par M. Brunon (1) pour le refoulement énergique en matrices *(fig. 6)*.

Le métal R est comprimé par un mandrin O dans le moule, dont les deux parties N et M sont maintenues par une traverse C réglée en hauteur au moyen de tiges filetées D assemblées avec le corps de presse A dont le piston B est actionné par un accumulateur hydraulique. Ce mode d'opérer convient particulièrement, lorsque la pièce présente un trou central comme l'indique la *figure 6*; le mandrin O, de forme conique ou parabolique, pressant le métal de l'intérieur vers l'extérieur.

La *figure 7* montre l'application au matriçage d'un tampon de wagon; la *figure 8* se rapporte au façonnage d'un bouchon de trou d'homme. Les presses hydrauliques pour matriçage présentent la disposition générale de la *figure 9* (modèle Henry Berry). Sur les plateaux se fixent à volonté les matrices.

Dans d'autres modèles, le piston hydraulique est supérieur, la table inférieure est fixe.

VII. — Rivetage.

Le rivetage est un procédé d'assemblage qui s'applique soit directement entre deux pièces *(fig. 1, 3, 2, 4, pl. XVIII)*, soit par l'intermédiaire d'un organe auxiliaire appelé rivet *(fig. 5, 6,*

(1) Brevet du 9 mars 1876. Presse par M. Brunon (Aix 1852).

7, 8, 9) constitué par une tige, généralement munie d'une tête avant la pose. La formation de la deuxième tête complète l'assemblage et s'appelle la rivure.

L'opération consiste à écraser la partie qui déborde; elle se fait au marteau par coups répétés, ou à la presse d'une façon continue.

L'assemblage direct n'est adopté que pour des petites pièces. La rivure, le plus souvent de forme prismatique, se fait à froid avec un marteau dit rivoir *(fig. 10)*; elle est achevée, régularisée au matoir, outil d'acier trempé *(fig. 3)* qui refoule le métal dans les vides, le mate sous l'action du marteau. Pendant le rivetage, les pièces sont maintenues pour tenir *coup au marteau.*

Dans les assemblages à rivets, on opère aussi à froid pour les petits rivets en fer et pour ceux en cuivre de toutes dimensions.

On opère à chaud pour tous diamètres au-dessus de 10^{mm} lorsque les assemblages doivent être étanches, lorsque les pièces doivent être bien serrées l'une contre l'autre, pour assurer leur solidarité. D'ailleurs, pour les gros diamètres, la haute température du métal permet seule d'opérer dans de bonnes conditions.

Le rivetage par rivets est devenu une opération très importante, par suite du grand développement des constructions métalliques constituées par des fers assemblés et rivés.

Quand on opère au marteau, le rivet est maintenu du côté de la tête, déjà formée, par une étampe dite contre-bouterolle montée sur un support, un truc à river ou un levier prenant appui sur des pièces *ad hoc (fig. 12, 13, 14)*. Le poids du tas contre-bouterolle doit être au moins de quatre à cinq fois celui du marteau.

La partie qui déborde est rabattue par deux ou trois ouvriers frappant vivement avec un marteau de 1 à 2^{kg} environ, puis la rivure s'achève à la bouterolle munie d'un manche *(fig. 15* et *16)*

et frappée au marteau à devant de 4 à 8^{kg} suivant le diamètre du rivet. Le matage complète l'opération si ce sont des parois de récipient. Les matoirs affectent les formes *(fig. 17)*, ils doivent être présentés sous l'inclinaison convenable ne relevant pas la pince ni ne pénétrant pas dans la tôle *(fig. 18)*. On préconise l'emploi de matoirs arrondis.

On reproche à la rivure au marteau de ne pas refouler suffisamment la tige lorsque les pièces réunies présentent une certaine épaisseur. La tige ne remplit bien le trou que dans le voisinage des têtes; il reste des vides particulièrement dans les parties des divers trous qui ne se correspondent habituellement que d'une façon imparfaite *(fig. 19)*, tandis qu'avec le procédé mécanique, tous les vides sont remplis et le métal peut être serré à ne pouvoir distinguer les lignes de joint lorsqu'on coupe l'assemblage par l'axe du rivet *(fig. 20 et 21)*.

Le rivetage à la machine s'impose surtout pour les gros rivets des ponts et des chaudières marines, exigeant à la pose un effort considérable, un travail pénible manuellement. Le procédé au marteau est alors trop long, plus dispendieux et moins efficace, car au-dessus de 25^{mm} de diamètre, la pratique courante emploie des marteaux de trop faible masse relative.

L'opération mécanique est simple : la tête formée du rivet s'appuie sur une contre-bouterolle A' *(fig. 11)* solidaire du bâti de la machine; la bouterolle A est montée sur la tête d'un pousseur convenablement guidé, recevant l'action mécanique, ou pression, qui refoule, écrase le métal, forme la deuxième tête saillante du rivet.

Suivant les sujétions du travail, la machine à river peut opérer à raison de cent à deux cents rivets par heure, tandis qu'une équipe de riveurs à la main pose environ trente à soixante rivets à l'heure selon le diamètre. Le rivetage à la presse est plus régulier et mieux assuré que celui au marteau; il peut être contrôlé aisément en ce qui concerne la pression exercée. La riveuse a aussi le grand avantage, pour les fortes épaisseurs

à assembler, de permettre, par une disposition auxiliaire, l'accostage ou serrage préalable des pièces; le refoulement de la tige se fait dans de meilleures conditions, en évitant que des bavures s'interposent aux joints des tôles et en assurant le parfait contact de celles-ci.

De même, l'appui parfait des têtes est mieux obtenu par la pression que par la percussion : la pression se transmet sans vibrations détruisant l'adhérence des rivets voisins; elle peut être prolongée, maintenue à volonté jusqu'à un refroidissement déterminé; la contraction de la tige développe le maximum de tension et l'étanchéité peut être obtenue sans nécessiter de matage.

Il est généralement recommandé (1), dans le rivetage à chaud, de ne pas achever la rivure au-dessus d'une température d'environ 200 à 250°, si l'on veut éviter la rupture des tiges, le décollement des têtes par les effets de contraction qui détermineraient des tensions supérieures à la résistance du métal, ou des tensions dépassant la limite d'élasticité et qui ne permettent plus de compter sur leur permanence. Ces effets se feraient surtout sentir sur les longs rivets qu'on devrait, au-dessus de $0^m,100$, poser à froid.

Or, la pratique ne s'inquiète guère de cette règle théorique qui ne saurait s'appliquer qu'à un métal non ductile, tandis que les rivets doivent toujours être confectionnés avec un métal qui puisse supporter, sans se criquer, les brusques changements de forme qu'ils subissent, présenter une grande résistance et un grand pouvoir d'allongement permettant de les poser à des températures très élevées.

Ainsi d'excellentes rivures sont obtenues avec des rivets d'acier chauffés au delà de 1000° et écrasés en quelques secondes, la température finale de la tige dépassant 800° et plus au cœur. Suivant les circonstances, les rivures sont cou-

(1) *Résistance appliquée* de DE MASTAING, de CONTAMIN. — *Éléments constructifs* d'UNWIN.

ramment achevées à des températures supérieures à 500°, sans laisser à désirer, soit au point de vue du serrage, soit au point de vue du décollement des têtes. Souvent même, la pratique prolonge l'action des bouterolles des machines à river pour augmenter le serrage, pour profiter du maximum de résistance élastique du métal. C'est avec raison que l'on peut opérer de cette manière, attendu que le fer et l'acier ont une résistance élastique qui augmente avec les allongements permanents subis.

Il suffit de rappeler qu'une éprouvette de traction étant soumise à des allongements permanents, sa résistance limite d'élasticité s'accroît successivement jusqu'à la rupture. Quelle que soit la période considérée, on constate que l'allongement élastique et qu'une réaction correspondante persistent.

Il s'ensuit donc que si la tige d'un rivet se contracte en déterminant un allongement supérieur à la limite d'élasticité, celle-ci se maintient en progressant.

Ce qu'il faudrait craindre avec le fer ou l'acier, ce serait : la faible ductilité que possèdent ces métaux vers la température critique de 300 à 400°, qui correspond à la cassure bleue. A ce moment du refroidissement, les réactions du martelage d'un rivet voisin peuvent produire des criques à la naissance des têtes des rivets posés précédemment, qui ne sont pas refroidis au-dessous de 300°, de sorte qu'il conviendrait, lorsqu'on emploie le marteau, de ne poser le rivet suivant qu'après complet refroidissement du rivet précédent.

Il faut attribuer les ruptures à la période critique de ductilité du métal, et c'est encore un des avantages de la presse de ne pas donner lieu à des vibrations les favorisant.

Il faut adopter pour les rivets un métal à résistance élastique assez grande déterminant un serrage suffisant (20 à 25^{kg} pour le fer ou l'acier doux à ductilité également très élevée).

Même avec l'achèvement de la rivure vers 250°, les têtes étant bien serrées, la rupture de tiges devrait se produire si elles ne s'allongeaient pas.

En admettant une chute finale de température de 200°, des rivets en fer ou acier à coefficient de dilatation égal à

$$\delta = 0{,}0000123$$

par degré, et à coefficient d'élasticité E = 20.000, la tension qui pourrait se développer dans la tige par l'effet de contraction serait :

$$R = Ei = 20.000 \times 0{,}0000123 \times 200^{\circ} = 49^{kg}$$

par millimètre carré.

Il n'est pas douteux que, sous des efforts inférieurs, la tige du rivet s'allonge, se trouve dans un état de tension qui se maintient vers la limite d'élasticité qui serait atteinte avec une chute de température d'environ 100°.

Une tige de 50^{mm} de longueur se refroidissant à partir de 600° prendrait, si elle était libre, un raccourcissement de

$$50 \times 600 \times 0{,}0000123 = 0^{mm},369;$$

l'allongement élastique étant estimé à

$$i = \frac{R}{E} = \frac{20}{20.000} = 0{,}001,$$

soit sur 50^{mm}, un allongement de 0^{mm},05; l'allongement permanent serait 0^{mm},369 — 0,05 = 0^{mm},319, c'est-à-dire environ 0,6 0/0. Or, le métal à rivets peut s'allonger de 15 à 20 0/0 et plus.

Les essais montrent que le meilleur mode de rivetage est celui pour lequel les rivets sont chauffés, sans être encrassés, vers l'orange clair, serrés fortement à la presse en maintenant la pression jusqu'à ce que la tête devienne noire. Le maintien de la pression a un effet très favorable, la tige est mieux comprimée, plus fournie; elle s'allonge moins sous l'effort de réaction des tôles, le serrage définitif est plus énergique, la résistance d'adhérence est maximum.

On reconnaît aussi que les tôles poinçonnées et bavurées donnent une plus grande résistance à l'adhérence que les pièces percées au foret et régularisées. La résistance de rupture serait aussi en faveur des trous poinçonnés; mais cette considération

ne saurait prévaloir contre celles qui motivent le perçage au foret ou le poinçonnage suivi de l'alésage pour obtenir la concordance parfaite des trous, ni contre l'enlèvement des bavures pour assurer le contact des pièces. Trop souvent, avec les trous poinçonnés, les axes ne coïncident pas, les tiges des rivets doivent être tenues à un plus petit diamètre pour la mise en place; elles se trouvent obliques aux faces de joint, et si l'on n'a pas soin de ramener la partie qui déborde, de la redresser quelque peu, les têtes sont fortement déviées *(fig. 20)*. Ce défaut est particulièrement accusé dans le rivetage mécanique, si la pièce est mal présentée et si les bouterolles ne sont pas bien guidées.

Dans une bonne rivure, on peut admettre que la tige est soumise à une réaction R par unité de section, un peu supérieure à la résistance limite d'élasticité initiale du métal à froid, ce qui permet de déduire la pression P de serrage et l'adhérence, qui est généralement un point essentiel.

La tension totale d'une tige de diamètre d est $P = \frac{\pi d^2}{4} R$; elle donne lieu à une pression égale à P sur chaque appui des têtes et sur chaque joint des pièces. L'adhérence sur les deux faces d'un même élément assemblé est : $2Pf$ (f est le coefficient de frottement).

Si, dans un essai d'adhérence, on mesure l'effort $2Pf = P'$ nécessaire pour produire le glissement de l'une des pièces intermédiaires, on peut déduire $f = \frac{P'}{2P} = \frac{2P'}{\pi d^2 R}$.

En rapportant l'adhérence A à l'unité de section transversale du rivet, on peut poser, puisqu'il y a deux faces de contact correspondant à deux sections :

$$A = Rf = \frac{4Pf}{\pi d^2} = \frac{2P'}{\pi d^2}.$$

Le coefficient d'adhérence ainsi défini est très variable (6 à 35^{kg}) suivant les conditions de la pose des rivets de fer et

d'acier. Par exemple : une rivure faite au marteau a donné 12^{kg} d'adhérence par millimètre carré de section de rivet, tandis que la rivure analogue faite à la machine a donné 26^{kg}, ce qui conduirait pour $R = 25^{kg}$ à des valeurs de

$$f = \frac{12}{25} = 0{,}48 \qquad \text{et} \qquad \frac{26}{25} = 1.$$

On constate que, lorsque la pose au marteau des petits rivets se fait trop rapidement, les réactions déterminent un allongement de la tige du rivet voisin de celui que l'on pose, et le serrage des têtes peut être réduit à une valeur telle qu'il est possible de faire pivoter à la main le rivet dans son logement; l'adhérence est pour ainsi dire nulle.

Pression de rivetage.

La pression développée pendant le rivetage varie avec la résistance à l'écrasement du métal, avec la section du rivet et le degré d'aplatissement.

Dans la rivure faite au marteau, il est très difficile d'estimer la pression qui s'exerce sous le choc. Pour apprécier au plus près l'effort convenable qui correspond à une rivure ne laissant rien à désirer, il faut opérer à la presse sous des charges variables. Dans les divers essais que nous avons faits, il était assez difficile de suivre la loi des efforts d'écrasement avec des rivets chauffés, la température variant rapidement au contact des outils et des pièces rivées. En opérant à froid, on peut déduire la loi des efforts avec grande exactitude et relever les formes successives de la rivure ainsi que nous l'indiquons *fig. 22, pl. XVIII)* et tableau n° 24 (ci-après).

Nous signalons un essai dans lequel la tige déborde un peu trop, a un volume plus grand que celui de la tête à former. Au début de l'opération, la tige se refoule sur toute sa longueur. Dès les premiers millimètres de rapprochement des bouterolles, les

pièces et le rivet sont en contact serré ; puis, la partie qui déborde se refoule davantage, la surface en contact avec l'outil s'agrandit peu à peu en gagnant vers l'axe de la tige et vers le pourtour de la tête qui s'ébauche, qui se crique de plus en plus à mesure qu'elle prend un plus grand développement. Les criques apparaissent dès les premières périodes de l'écrasement, alors que l'allongement de pourtour est d'environ 20 0/0. L'allongement final de pourtour atteignant $\frac{24,5 - 14}{14} = \frac{10,5}{14}$ ou 75 0/0, on conçoit que des criques très prononcées se produisent à froid. On ne peut opérer qu'avec un métal très ductile, tel que le cuivre recuit, ou le fer fondu de variété spéciale,

Dans les rivures faites à froid au marteau *(fig. 23* et *24)*, le métal s'écrase d'une tout autre façon. La tige ne se renfle guère ; la partie supérieure s'étale d'autant plus que les coups sont plus faibles ; les criques se développent nombreuses et des parties de métal se détachent, montrant qu'il n'est possible d'opérer à froid que sur des rivures coniques encastrées si le métal n'a pas une ductilité suffisante. Les rivures faites à chaud et achevées à la bouterolle présentent aussi des criques apparentes, particulièrement lorsque la tête est trop rabattue au marteau, ou se trouve déviée de l'axe de la tige. Il conviendrait de ne donner que quelques coups d'intensité plutôt forte que faible et même d'employer la bouterolle dès le début de l'opération, afin d'obtenir une tête par renflement de la tige et non par étalement de la partie supérieure.

Dans la rivure *figure 22*, on peut remarquer l'augmentation relativement très prononcée du diamètre de la tige et du trou, porté de 14^{mm} à $16^{mm},25$, soit un allongement de pourtour d'environ 14 0/0 pouvant donner lieu à des criques dans les trous s'ils ont été poinçonnés, ou si le métal est peu ductile. Avec des rivets chauffés, cette augmentation de diamètre est peu sensible si la pression finale n'est pas exagérée.

On voit aussi que la tête s'est encastrée partiellement dans

Essais de rivures à froid ou à chaud.

DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	DIMENSIONS diverses	RÉDUCTION de la distance entre les outils	CHARGES successives	CHARGES par mm² de section primitive des trous	ÉNERGIE	OBSERVATIONS
	mm	mm	Kg	Kg	Kgm	
Rivet de fer fin recuit écrasé à froid à la machine à essayer.		0,5	5.500	34	2,5	
		1	7.800	48	6	
		2	9.000	55	14	Le jeu de la tige n'existe plus.
		3	10.000	61	23,2	
Diam. primitif de la tige du rivet .	14	4	10.500	64	33,2	
— des trous.	14,4	5	11.800	72	44,3	
Section primitive des trous	162,8	6	13.200	81	56,5	
Epaisseur des pièces	18,5	7	15.500	95	71	La rivure présente trois criques.
Longueur de la tige du rivet	40	8	18.400	113	88	
Diamètre final de la tige	16,25	9	22.000	135	108,3	Les criques se multiplient (voir *fig. 22, pl. XXV*).
Section finale de la tige	207	10	27.000	166	132,3	
Charge par mm² de section finale . .	242	11	32.000	196	161,1	A l'essai de cisaillement, la tête de la rivure s'est brisée; la cassure accusait un métal fortement écroui à grain fin, tandis que le fer à l'état primitif donnait une cassure à nerf sans trace de grain.
		12	40.000	246	196,6	
		13	50.000	307	241	
Rivet de fer comme ci-dessus écrasé à chaud au rouge cerise.		1	1.800	11	1,3	Les éléments de cet essai, non calculés, ont été déduits d'un diagramme relevé automatiquement par l'appareil enregistreur de la machine à essayer (modèle Delaloe). Ce diagramme a été rapporté *(fig. 23, pl. XXV)*, à la même échelle que celui de l'essai à froid.
		2	1.900	11,7	3,1	
		3	2.000	12,3	5	
		4	2.100	12,9	7	
		5	2.400	14,8	9,2	
Diamètre final de la tige.	14,8	6	3.700	22,7	12,2	
Section finale de la tige	172	7	4.400	27	16,2	
Charge par mm² de section finale .	104	8	5.800	35,6	21,3	
		9	7.300	45	27,7	
		10	9.600	59	36	
		11	12.300	75,5	46,6	
		12	18.000	110	61,5	

Tableau n° 24.

la bande de fer et que les bouterolles ont laissé une légère marque sur les pièces qui se sont un peu embouties sous la pression de 50.000^{kg}.

Ces déformations montrent qu'il convient de ne pas laisser trop de métal pour la formation de la tête, ni exagérer la pression (1). Si l'on opère à chaud, une partie peut refluer au pourtour de la bouterolle, mais la plus grande partie serait refoulée dans le trou qui, s'agrandissant outre mesure, présenterait des criques. Il faut chercher à obtenir une tête bien fournie sans bavures. La partie qui déborde doit tenir compte du refoulement dans le trou, refoulement d'autant plus volumineux que l'épaisseur totale des pièces est plus forte. Si la rivure est faite au marteau, l'augmentation de la longueur de la tige peut varier de 0,1 à 0,2 de l'épaisseur des pièces, tandis qu'avec des riveuses, il faut prévoir un surcroît de refoulement des tiges et porter le supplément de longueur de $0{,}2l$ à $0{,}3l$.

La pression par millimètre carré de surface projetée de tête s'est élevée dans l'essai considéré à

$$\frac{50.000}{\frac{3{,}14 \times 24{,}5^2}{4}} = \frac{50.000}{471} = 106^{kg}$$

et par millimètre carré de section finale de tige à

$$\frac{50.000}{207} = 242^{kg}$$

ou par millimètre carré de section primitive de tige à

$$\frac{50.000}{154} = 325^{kg},$$

(1) Avec les tôles d'acier doux, le renflement des tiges de rivets est particulièrement dangereux. Signalons le fait suivant: dans une tôle d'acier constituant une partie de grande virole de cuvelage, un certain temps après l'assemblage, il se produisit une rupture brusque sur la ligne des rivets et sur une longueur de plus d'un mètre. Cette rupture peut être attribuée aux réactions des tiges dans les trous et à la faible ductilité de l'acier après mise en œuvre. Cet acier présentait aux essais de traction une résistance de 44^{kg} et un allongement de 24 0/0.

valeur excessive qui a déterminé le refoulement t ès prononcé de la tige dont le diamètre 14^{mm} a pris $16^{mm},25$.

Dans divers essais analogues, on constate que, pour des rivures à froid, la tige est suffisamment refoulée, remplit bien le trou sans augmentation sensible du diamètre, avec des pressions de 180 à 200^{kg} par millimètre carré de section primitive de tige.

Dans les rivures à chaud, on conçoit que la température a une grande influence sur l'opération. On obtient de bons résultats avec des pressions finales variant de 60 à 100^{kg} suivant le degré de chauffe. Une pression de 60 à 70^{kg} ne saurait donner une bonne rivure si le métal (fer ou acier doux) est à une température inférieure à 700° (rouge sombre). Si la riveuse ne permet pas de porter la pression vers 90 à 100^{kg}, il faut chauffer au jaune orange (1000 à 1100°) et opérer rapidement de manière à développer un coup de bélier, si possible.

Avec de faibles pressions finales, la tige peut être suffisamment refoulée, mais la tête n'est pas bien formée. Parfois, les rivures étanches sont faites avec des pressions finales de plus de 150^{kg} par millimètre carré de section de tige, ce qui permet d'abaisser la température de pose. Des rivets de diamètres différents étant posés avec une même machine, on règle l'opération au mieux du travail, en faisant varier la température.

Le diagramme des pressions sur un rivet à chaud *(fig. 25)* diffère peu, comme allure générale, de celui d'une rivure à froid; la progression est seulement plus rapide vers la fin de l'opération. On conçoit que l'ordonnée extrême, si la pression avait été prolongée jusqu'au complet refroidissement, tendrait vers une valeur égale à celle de la rivure à froid.

Les deux diagrammes permettent de comparer les deux procédés de rivetage au point de vue des efforts à développer et des énergies d'écrasement nécessaires. Il suffit, ici, de faire ressortir le rapport des énergies totales $\frac{241}{61,5} = 4$.

Il faudrait environ quatre fois plus d'énergie à froid qu'à chaud dans les conditions où se sont faits ces essais.

L'énergie moyenne par unité de section primitive de la tige du rivet serait :

à froid $\frac{241}{154} = 1^{kgm},56$, à chaud $\frac{61,5}{154} = 0^{kgm},4$,

de sorte que, pour un rivet de diamètre d de proportions semblables, l'énergie d'écrasement pourrait être estimée en posant :

à froid $T = \frac{\pi d^2}{4} \times 1,56 = 1,22d^2$,

à chaud $T = \frac{\pi d^2}{4} \times 0,4 = 0,314d^2$.

Par exemple, un rivet de 25^{mm} de diamètre exigerait

à froid $T = 1,22 \times 625 = 762^{kgm}$,

à chaud $T = 0,314 \times 625 = 196^{kgm}$.

Il faut doubler ou tripler ces valeurs pour estimer l'énergie dépensée par la riveuse.

Si on rapporte le travail du rivetage à l'effort moyen p développé sur la tige et en admettant que le déplacement utile de la bouterolle soit égal au diamètre d du rivet, l'expression du travail serait : $T = \frac{\pi d^2}{4} pd = 0,8pd^3 kgm$. A froid, p peut varier de 60 à 80^{kg} pour le fer et l'acier; à chaud, p peut varier de 15 à 25^{kg} ou plus suivant la température de pose.

Un point essentiel d'une rivure est la résistance qu'elle présente au glissement et au cisaillement, suivant qu'elle est faite à froid ou à chaud, au marteau ou à la riveuse.

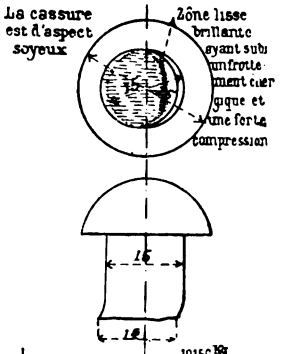
Nous signalerons seulement (tableaux nos 25 et 26) les résultats d'essais faits au marteau à froid et à chaud avec des rivets en fer fondu forgé.

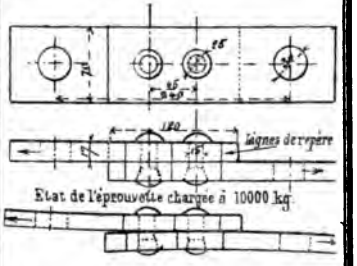
Ils montrent que la rivure à froid encastrée résiste aussi bien que la rivure à chaud saillante, de sorte que, quand il s'agit de travaux de sujétion particulière, de réparation ou autres, et lorsqu'une grande adhérence n'est pas nécessaire, on peut indifféremment adopter l'un ou l'autre mode de rivetage.

Essais de résistance des rivures à l'adhérence et au cisaillement.

Tableau n° 25.

N° D'ORDRE	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	DIAMÈTRE	SECTION	DÉPLACEMENTS relatifs	CHARGES totales	RÉSISTANCE par mm² de section	OBSERVATIONS
					Kilog.	Kilog.	
1	Rivure double à froid avec rivets en fer fondu forgé. Pour deux rivets	15mm	176	»	2.000	»	Cet essai a été fait à faible vitesse, la durée a été de 35 minutes. A 3.000kg, les lignes de repère paraissent se déplacer.
				»	3.000	»	
			352	»	3.500	10	
				0,1	3.800	»	
				0,15	4.000	11,4	
				0,2	4.500		
				0,3	5.000	14,2	
				0,4	5.500		
				0,5	6.000	17	
				0,7	6.500		
				0,9	7.500		
				1,1	8.000	22,7	
				1,5	8.500		
				2	9.000	25,6	
				2,5	9.300		
				3	9.600		
				3,2	9.700		
				3,5	9.800		
				3,8	9.900		
				4	10.000	28,5	
				4,2	10.100		
				4,5	10.150	29	
				5	10.000		
				5,2	9.450		
				5,5	8.000	22,7	





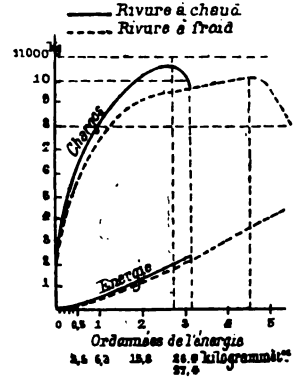
A 9000kg les places sont écartées de 0mm,5 aux abouts
A 9600kg — — 1mm —
A 10000kg — — 1mm,5 —
A 10000kg — — 2mm —

Rupture après une minute d'action de la charge 8000kg et sans pouvoir distinguer quel rivet s'est rompu le premier.

A 9000kg les faces de joint sont écartées sur toute leur longueur d'environ 0mm,9 entre les deux rivets et de 0mm,5 aux abouts.

L'énergie de rupture par millimètre carré de section est égale à $\frac{47.9}{352} = 0^{kgm},136$.

N° D'ORDRE	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	DIAMÈTRE	SECTION	DÉPLACEMENTS relatifs	CHARGES totales	RÉSISTANCE par mm² de section	OBSERVATIONS
					Kilog.	Kilog.	
2	Rivure double à chaud avec rivets en fer fondu forgé et têtes saillantes, pour deux rivets. Après rupture on constate sur les surfaces d'appui de la tête et de la tige du rivet une pellicule d'oxyde charbonneuse. L'énergie de rupture $= \frac{27,4}{352} = 0,0775$ valeur plus petite que 0,136, trouvée pour la rivure à froid.	15mm	176	0	2.000		Cet essai a été fait dans les mêmes conditions que celui à froid, en vue de comparer les résistances des deux espèces de rivures. La rivure à froid remplissant moins bien le trou et le métal conservant plus de ductilité, la rupture se produit sous un déplacement de 5,5 plus élevé que le déplacement 3,1 se rapportant à la rivure à chaud. L'aspect de la cassure est plus soyeux à froid qu'à chaud et la zone de glissement de compression est plus grande à froid qu'à chaud, ce qui montre bien la différence de ductilité.
			352	»	3.500	10	
				0,1	4.000		
				0,2	5.000	14,2	
				0,3	5.500		
				0,4	6.000	17	
				0,5	6.500		
				0,7	7.500		
				0,8	8.000	22,7	
				0,9	8.500		
				1,2	9.000	25,6	
				1,5	9.500		
				1,8	10.000	28,5	Les faces de joint sont décollées sur toute la longueur.
				2	10.100		
				2,2	10.500	29,8	
				2,3	10.600		
				2,4	10.700		
				2,5	10.800	30,6	
				2,6	10.850	30,8	
				2,8	10.900	31	
				3	10.500	29,8	Les pinces sont écartées de 0mm,5 aux extrémités et de 0,3 au milieu.
				3,1	10.100	28,7	La cassure est d'aspect soyeux avec points noirs. Le point essentiel étant la résistance aux premiers glissements, les diagrammes montrent que les deux rivures se comportent à très peu près de la même manière jusqu'à la charge de 5 à 6.000kg donnant un glissement sensible d'environ 0mm,5. On peut prendre pour valeur de la limite du frottement ou de l'adhérence 4.000kg donnant ainsi 11kg par millimètre carré de section de rivet. Cette valeur correspond à celle ordinairement admise pour ces rivures. Les essais nos 1 et 2 ont été répétés chacun trois fois et ont donné des résultats très concordants.



Nous avons vu précédemment que la pratique ne saurait poser des gros rivets à froid à tête saillante, et qu'à chaud l'adhérence ou résistance au glissement pouvait dépasser 30^{kg} par millimètre carré avec des rivets en acier doux ; ordinairement il faut tabler sur une valeur de 15^{kg}. C'est le seul élément à rappeler ici (1).

Machines à river.

L'opération si simple du rivetage, mais qui se répète à l'infini et a parfois une si grande importance au point de vue de la solidité et de la sécurité des constructions, a donné lieu à la création de machines que l'on peut classer : en riveuses par percussion, en riveuses par pression continue.

Ces dernières sont les plus employées.

Les riveuses peuvent aussi se distinguer par leur fixité ou par leur mobilité à volonté ; par l'agent moteur qui comprend, soit des organes rigides, soit des organes rigides combinés avec des fluides sous pression tels que la vapeur, l'eau, l'air, l'acide carbonique ou avec le courant électrique.

Nous ne pouvons que signaler sommairement les dispositions de ces machines.

L'opération du matage a également donné lieu à l'application de petits marteaux mécaniques dont nous indiquerons l'un des spécimens.

Marteau à river de MM. Allen et Rœder (2).

Les marteaux mécaniques à river n'ont pour ainsi dire d'application que dans les travaux de montage où l'outil se déplace à volonté.

Le marteau tel que celui de MM. Allen et Rœder est actionné par l'air comprimé amené par une tuyauterie flexible.

---

(1) On admet ordinairement pour résistance de cisaillement des rivets en cuivre, 15 à 20^{kg} ; des rivets en fer, 25 à 30^{kg} ; des rivets en acier doux, 30 à 40^{kg}.

(2) Brevet du 15 décembre 1876.

La *figure 1*, *planche XIX*, montre : que le bâti J du marteau est fixé sur la pièce par une tige T à écrou ; que la sous-bouterolle est adaptée à un support Q pouvant pivoter autour de la tige T. Le pilon R présente une tête évidée correspondant à une petite portion de la surface de la tête du rivet, ainsi que l'indiquent les *figures 6*, *7*, *8*, et cela, afin de pouvoir écraser le rivet et former la tête avec des coups d'intensité réduite. Mais, pour atteindre toutes les parties de la tête, le marteau R possède un mouvement circulaire intermittent donné par l'encliquetage *(fig. 2, 3, 4)* actionné par le mouvement rectiligne alternatif du marteau, qui porte un doigt coulissant dans une rainure héliçoïdale de la douille N solidaire du rochet de l'encliquetage.

La distribution du fluide moteur se fait d'une façon automatique après mise en marche, et l'air comprimé ayant agi pour faire descendre le marteau est utilisé pour le faire remonter en agissant sur l'organe de distribution qui fonctionne rapidement et permet de multiplier les coups.

La *figure 11* est une variante perfectionnée du marteau *(fig. 1)*, le support se prêtant au déplacement pour amener l'outil bien en place. Les *figures 12* et *13* montrent les détails du support J.

Cette machine a encore les dispositions *(fig. 9* et *10)* comportant deux leviers articulés formant pince serrant sous l'action d'un piston S' la sous-bouterolle contre le rivet, l'autre branche Y prenant appui sur la pièce et portant le marteau. L'ensemble de cette machine mobile est suspendu à un appareil de levage et peut prendre toutes les positions nécessitées par le travail.

La disposition *(fig. 9)* convient pour la pose des rivets situés au milieu de panneaux de grande largeur.

Dans les chantiers de constructions navales où la facilité d'installation des riveuses joue un grand rôle, la riveuse électrique de Rowan (1) est avantageusement utilisée. Cette riveuse

(1) *Génie Civil* du 23 juin 1888. Rowan, électricien de Glascow.

mobile *(fig. 14)* est munie de puissants électro-aimants EE′ pour la fixer à volonté sur la pièce. Une réceptrice M actionne, par l'intermédiaire d'engrenages et d'une came C, la tige T portant l'étampe frappeuse dont le collet s'appuie sur un fort ressort qui est tendu lorsque la came éloigne la tige et qui projette l'outil vers le rivet, quand la came abandonne la tige. Pour tenir coup, la contre-étampe, munie d'une vis V de réglage, a sa monture fixée sur la pièce au moyen de deux électro-aimants FF′. La liaison entre la vis V et la contre-étampe se fait au moyen d'un ressort qui compense le jeu produit par

Fig. 83

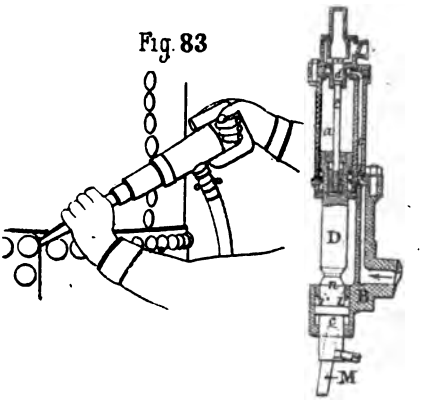
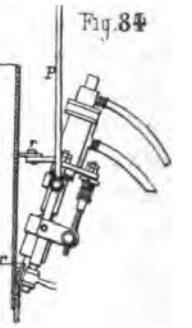


Fig. 84



l'aplatissement de la tête du rivet sous les coups de l'étampe-marteau. L'engin pour tenir coup est, au besoin, armé d'un bras B *(fig. 15)* qui permet d'opérer au plus près dans les pièces d'angle.

Matage mécanique. — L'opération du matage à la main des pinces des tôles pour récipients étanches exige une longue main-d'œuvre que l'on a cherché à réduire par l'emploi d'une mateuse telle que celle *figure 83*. C'est un marteau à air comprimé actionnant le matoir M monté obliquement sur un coulisseau piston C ajusté avec précision dans la tête du bâti B, de manière à ménager des chambres d'air formant matelas ou

ressort déterminant le relèvement de l'outil, pour faciliter son déplacement de proche en proche sur la pince à mater.

Le marteau D bat rapidement sur la tête du coulisseau porte-outil C, la commande des organes distributeurs se faisant d'une façon automatique.

La *figure 84* montre que l'outil peut, pendant le travail, être dirigé aisément tout autour d'une virole. La machine est suspendue et un guide T s'appuie contre la paroi (1).

Riveuses à organes rigides.

La riveuse à organes mécaniques rigides *(fig. 16* et *17, pl. XIX)* a été établie par le constructeur anglais De Bergues vers 1850 (2). Elle comporte une contre-bouterolle A′ à tête rapportée et tige filetée permettant de régler l'écartement des outils selon les épaisseurs à river; une bouterolle A également à tête rapportée et rechangeable avec la dimension de la tête du rivet; la bouterolle est engagée dans un fourreau D ou coulisseau possédant un mouvement rectiligne alternatif donné par la bielle F et l'excentrique G venu de forge avec l'arbre de la machine. Un rivet et les pièces à assembler étant interposés entre les deux outils, la pression exercée par la bouterolle écrase le rivet et forme la tête d'un seul coup.

L'arbre de commande marchant d'une façon continue, un bloc de débrayage et d'embrayage K est placé entre la bouterolle A et le pousseur présentant une mortaise de longueur suffisante pour permettre le mouvement de va-et-vient.

Cette disposition à organes rigides a le grave inconvénient de laisser indéterminée la pression exercée et qui dépend de la longueur du rivet et de l'écartement des bouterolles. Cette

(1) Brevet Pollock, 18 janvier 1881 (*Engineering*, 2 août 1887).

(2) On attribue à Fairbairn les premières machines de cette catégorie. Elles furent employées pour la construction des ponts tubulaires de Conway et de Britannia (1846-1849). Dans le pont de Britannia, on n'employa pas moins de deux millions de rivets pesant environ neuf cents tonnes.

pression pouvant s'élever outre mesure et briser un organe principal, on munit le bloc de débrayage d'une pièce d'appui K', en fonte, qui s'écrase sous la pression maximum qu'il ne faut pas dépasser (soit 50.000, 80.000 ou 100.000[kg]). On se dispense de cette disposition, dans le modèle *(fig. 18)*, en articulant le montant C' en K avec C, et en le reliant par des tiges T' à la tête d'un piston hydraulique T, en communication avec un régulateur de pression X, par un tuyau Y.

Machine à river à plateaux de friction (modèle Le Brun) (1).

L'emploi de plateaux de friction pour la commande du plongeur porte-bouterolle par l'intermédiaire d'une vis *(fig. 19* et *20, pl. XIX)* prévient tout effort anormal sur les organes. Si l'effort dépasse une valeur donnée, il y a glissement du plateau G de la vis sur le plateau de commande.

La contre-bouterolle E est montée, à demeure, sur la borne B sans nécessiter de réglage pour l'épaisseur à river. La bouterolle D est adaptée sur le plongeur C, ajusté avec l'extrémité de la vis de manière à permettre la rotation de cette dernière, tout en se déplaçant longitudinalement sans faire tourner le plongeur, qui est de gros diamètre, pour obtenir un guidage convenable dans la tête du bâti. La vis est prolongée sur partie lisse qui traverse un support guide évitant tout porte-à-faux.

Un ensemble de leviers et de buttées assurent le déplacement des plateaux H et H', actionnant à tour de rôle le plateau G.

La manœuvre pour la pose du rivet, c'est-à-dire pour l'écrasement, se fait par un levier à main manœuvré par l'ouvrier qui règle à volonté la puissance du coup dans une certaine limite. C'est la puissance vive du volant-plateau G qui détermine l'effort et le travail d'écrasement. L'effort sur le rivet peut atteindre 120[t] avec ce modèle.

(1) Ce modèle de machine a été construit par M. Le Brun, de Creil, il y a une quinzaine d'années.

Riveuses à vapeur.

La première riveuse à vapeur a été construite, dès 1844, par Cavé, pour Lemaître. Elle présentait les dispositions *figures 1* et *4, planche XX.*

Dans cette machine, le constructeur a réalisé la double action : serrage préalable des tôles, écrasement du rivet.

La partie antérieure du bâti est pourvue d'une espèce de bigorne sur laquelle se place la pièce, par exemple : une virole de chaudière. La bigorne est munie du tas contre-bouterolle.

Dans la tête du bâti coulisse un fourreau F commandé par bielle et levier relié à l'un des pistons-vapeur.

La bouterolle B coulisse dans le fourreau F et est également commandée par bielle et levier articulé à la tige de l'autre piston-vapeur.

Des leviers, à portée de l'ouvrier, sont en relation avec les tiroirs de distribution.

Le rivet étant engagé dans son logement, l'ouvrier fait descendre sans brusquerie le fourreau F pour serrer les tôles; puis, immédiatement, il actionne le tiroir du deuxième cylindre-vapeur assez vivement pour déterminer la descente rapide de la bouterolle qui opère ainsi avec grande énergie.

Un certain nombre d'ateliers possèdent encore des machines Lemaître; le rivetage est rapide et fait dans d'excellentes conditions.

Machine à river de Cook.

En Angleterre, vers 1850, les machines à river à vapeur étaient assez répandues et du modèle Cook *(fig. 2)* (1).

La borne B est disposée de manière à permettre le rivetage de viroles. Cette borne est rapportée sur la plaque du bâti avec laquelle elle est assemblée par un fort clavetage.

Le rivet est écrasé sans serrage préalable des tôles.

(1) *Portefeuille des Machines*, 2e année, 1857.

Le coulisseau porte-bouterolle C est commandé par une manivelle-excentrique E dont le bras de levier L est articulé avec la bielle A, articulée d'autre part avec le piston à fourreau qui reçoit l'action de la vapeur.

L'ouvrier conduit la manœuvre au moyen du levier D. De plus, afin de régler automatiquement la course du coulisseau C les leviers en relation, d'une part, avec l'excentrique, d'autre part avec l'arbre du levier D, déterminent l'oscillation de ce dernier produisant l'émission de la vapeur et la descente du piston, par l'action de la vapeur sur le dessus du piston et sur une surface annulaire réduite.

Cette machine est ordinairement multiple et comporte, de chaque côté de l'appareil à river, une poinçonneuse et une cisaille.

Machine à river de Gouin.

La machine à river de Gouin *(fig. 3, 5, 6)* est aussi du type horizontal. Elle présente des dispositions bien étudiées et remplit la double action : serrage préalable des tôles, suivi de la rivure.

La tête T de serrage des tôles est montée directement sur le fourreau F d'un piston-vapeur A de diamètre réduit.

La bouterolle B est montée sur la tige d'un deuxième piston C de grand diamètre (960^{mm}).

La vapeur agit d'abord sur le piston A, serre les tôles; puis on introduit de la vapeur vive dans le cylindre du piston C pour écraser le rivet.

Pour ramener les pistons en arrière, on utilise la même vapeur, celle qui a servi à l'opération.

Les pistons sont munis de parties renflées à l'arrière, de manière que la surface d'avant soit plus grande que la surface d'arrière: il s'ensuit qu'en faisant communiquer les deux compartiments de chaque cylindre, avant et arrière, la vapeur repoussera chacun des pistons.

Le bâti de cette riveuse est en tôle et fers assemblés qui lui assurent une grande résistance.

Riveuses hydrauliques. — L'application de la pression hydraulique au rivetage a été faite en premier lieu en Angleterre, vers 1871, par M. Tweddell.

Les riveuses hydrauliques ne diffèrent de la riveuse à vapeur à action directe que par des dispositions de détails de la distribution qui est en communication avec un accumulateur hydraulique.

La haute pression de l'eau (75 à 150^{kg} par centimètre carré) a permis de réduire le diamètre du cylindre porte-bouterolle dont la construction dans les premiers modèles de ces machines est indiquée *figure 3, planche XXI.*

Le piston F reçoit l'action de l'eau sur toute sa surface d'about annulaire, l'introduction du liquide ayant lieu par l'orifice H en communication *(fig. 4)* avec le conduit I d'arrivée, lorsque la soupape K est dégagée par le levier L; la soupape K′ règle l'évacuation de l'eau par le conduit I′; elle est manœuvrée en même temps que K revient sur son portage, par le levier L′. Les ressorts R agissant sur les soupapes KK′ assurent la fermeture rapide.

Pour ramener le piston F en arrière, quand l'opération est effectuée, on ouvre la soupape K′ et de l'eau sous pression étant constamment introduite au centre du piston F, dans la chambre M par le conduit ménagé dans la tige fixe N pourvue d'un piston P, le piston F recule et chasse l'eau de la chambre G.

L'eau de l'intérieur du piston F exerce son action d'une façon permanente, n'exigeant ainsi aucune manœuvre particulière; elle est amenée de la conduite J *(fig. 1)* par la tubulure Q placée à l'arrière du bâti.

On a soin de rafraîchir la bouterolle D *(fig. 1)* par de l'eau arrivant du tuyau J″.

Dans ce modèle de riveuse, la pression préalable des tôles

n'est pas réalisée, ce qui, pour des travaux ordinaires, n'est pas indispensable si l'on produit une pression très énergique sur la rivure.

Ce n'est qu'en 1880 que M. Tweddell a adopté la disposition *figure 5* (1), comprenant un plongeur A porte-bouterolle et plongeur B à fourreau portant la tête de serrage des tôles.

Du côté de la contre-bouterolle, M. Tweddell dispose parfois *(fig. 6)* une tête de serrage sollicitée par une pression d'eau affluant dans la chambre B'.

La construction des plongeurs *(fig. 5)* permet, en suspendant la pression du plongeur de la tête de serrage, de reporter cette pression sur la tête du rivet, attendu que l'eau actionnant le plongeur B prend appui sur l'avant-annulaire du piston A, qui se trouve déchargé lorsqu'on arrête la pression sur B.

Les riveuses hydrauliques se sont très répandues depuis dix ans; cependant, divers constructeurs préfèrent encore la riveuse à vapeur qui, pour certains travaux, est plus rapide.

Quelquefois, comme *figure 7*, la tête de riveuse est mobile, peut pivoter à volonté, ce qui facilite l'opération de diverses rivures.

Certaines machines sont disposées pour opérer en deux coups de piston. Une première pression forme la tête lentement et serre les tôles ; une deuxième est donnée avec violence, avec choc, et la bouterolle est maintenue sur la tête du rivet jusqu'à ce que le métal soit devenu noir. Le rivetage est reconnu supérieur.

Ce mode de rivetage pourrait être employé pour de gros rivets posés avec une machine trop faible pour exercer un effort continu suffisant.

Lorsqu'on opère par pression hydraulique fournie par un accumulateur, le coup de bélier donnant la pression finale produit un effet analogue à celui recherché ci-dessus.

---

(1) Brevet du 10 novembre 1880. (*Engineering*, 17 juin 1881.)

En vue d'assurer une bonne étanchéité de l'assemblage, les riveuses de M. Henry Berry (nouveau modèle) sont construites sur le type dit à double ou à triple action en y ajoutant des cylindres de pression et un double tiroir de distribution, de manière à presser l'une contre l'autre les pièces métalliques avant d'écraser le rivet.

L'opération comporte : le rapprochement du manchon avec une pression de 40^{t} par exemple, pour serrer les tôles. Puis la bouterolle écrase le rivet avec une pression qui peut être de 80^{t}.

Le cylindre principal est calculé, dans ce cas, pour travailler à une pression de 120^{t}, réduite à 80 par la contre-pression de la première presse. Si on supprime l'action de cette dernière, la bouterolle travaille finalement avec sa pression de 120^{t} et termine la rivure.

Suivant le diamètre du rivet, on voit que la pression par millimètre carré de section de rivet peut varier de 100 à 150^{kg} et plus si l'on tient compte du coup de bélier.

Un excès de pression est toujours favorable à la bonne exécution d'une rivure pour assurer un parfait contact, une adhérence telle que les fuites ne peuvent se produire dans les assemblages de récipient; mais il ne faut pas l'exagérer si l'on veut éviter un effet d'emboutissage relevant les pinces, ou la pénétration des bouterolles dans les tôles au pourtour des têtes.

On cite (1) comme l'une des principales applications de la rivure hydraulique, le rivetage des tôles des grosses chaudières marines qui exigent la pose de rivets d'acier de 75^{mm} de diamètre. Ces rivets se placent à raison de 8 par minute avec une machine de 200^{t}, soit en développant une pression d'environ 50^{kg} par millimètre carré de section du rivet.

La moitié de la pression est employée pour donner un premier écrasement du rivet qui reçoit ensuite la pression totale.

L'eau est fournie par deux pompes horizontales à double effet,

(1) *Génie Civil* du 5 avril 1890.

qui donnent une pression de 105^{kg} par centimètre carré. L'accumulateur atteint 330^{r}, les rondelles de chargement pèsent 100^{r}.

Riveuse hydraulique à action directe. — Afin de supprimer l'accumulateur et la tuyauterie de raccord, faciliter l'installation de la riveuse hydraulique, M. Delaloe (1) a adapté la pompe de compression sur la machine elle-même en l'actionnant par un mécanisme à vis, engrenages et poulies de commande permettant de développer des efforts énergiques sur le piston porte-bouterolle, dont le fonctionnement comprend deux périodes en vue de rendre l'opération facile et économique.

La *planche XXII* représente le type ordinaire d'une machine à river fixe.

La contre-bouterolle A′ à tête rechangeable est solidement fixée sur la branche du bâti de forme convenable pour le rivetage de viroles ou de poutres, l'évidement du bâti étant prononcé.

La bouterolle A est montée sur la tête rapportée C′ du plongeur C *(fig. 3)* dont le cylindre en deux parties DD′ est rapporté sur le bâti B, de manière à pouvoir être facilement remplacé au besoin.

La partie arrière du piston C reçoit la poussée du liquide transmettant l'effort du plongeur I du compresseur. Le liquide, glycérine et eau, pour qu'il soit incongelable, sert d'une façon permanente; il est contenu dans le réservoir F et dans le corps de pompe H, tous deux en communic ation par le tuyau G

L'opération se fait comme suit :

La bouterolle est rapidement mise en contact avec le rivet par la manœuvre du volant E *(fig. 1)* dont l'arbre porte un pignon C_1' agissant sur la crémaillère C_1, rapportée sur le piston C.

(1) Brevet Delaloe (Ang. 1855) du 26 février 1885. Cette machine est construite par la maison Piat.

Pendant ce mouvement, le liquide du réservoir F peut à volonté affluer dans le cylindre D par le conduit G_1, la soupape U étant soulevée au moyen du doigt T' monté sur l'axe d'une manette T que l'ouvrier a rabattue pour mettre en communication la capacité G_2 avec G_1, la capacité G_2 étant en communication constante avec F par un conduit G_3 *(fig. 3 et 4)*.

La bouterolle A étant en contact, on fait agir le compresseur I dont la vis J est en relation par les engrenages KK', LL' avec l'arbre de commande M portant un double jeu de poulies recevant, l'un une courroie droite, l'autre une courroie croisée, afin d'obtenir à volonté et automatiquement la rotation de la vis J dans les deux sens, produisant ainsi soit la compression du liquide dans la capacité H, soit son aspiration pour le retour du plongeur porte-bouterolle, quand la rivure est achevée; retour fait aussi en partie avec le volant-manivelle E.

Le liquide comprimé est refoulé par le tuyau G dans le conduit G_1, la soupape U étant alors abaissée.

La compression produit un écrasement rapide et graduel du rivet. L'effort est contrôlé par un manomètre. Une soupape de sûreté V *(fig. 3)* peut être chargée à volonté à la limite que l'on s'impose, tout en facilitant le réglage du débrayage de la commande pour le relèvement du plongeur. Ces machines, parfaitement étudiées, donnent d'excellents résultats à divers titres. L'un des principaux consiste dans l'économie que l'approche à la main permet de réaliser par rapport aux riveuses avec accumulateur qui dépensent un plus grand volume d'eau sous pression (1).

Riveuses mobiles hydrauliques. — Les riveuses mobiles présentent les modèles divers *(fig. 1, 2, 3)* de la *planche XXIII.*

Ces riveuses rendent de grands services pour assembler les

(1) Rappelons que M. L. Husson (Châlons 1865) a appliqué la transmission hydraulique dans une riveuse dont la vis du plongeur était actionnée par des plateaux de friction, en 1887 (*Bulletin technologique*, 1887, page 218).

pièces dans les ateliers de montage ou sur place à pied d'œuvre.

Elles se prêtent à toutes positions pour atteindre le rivet à placer.

Ordinairement, la machine est suspendue à un appareil de levage, et comme elle est bien équilibrée, elle se manœuvre facilement.

Le liquide compresseur provenant d'un accumulateur arrive par une conduite dont les parties avoisinant la machine sont flexibles, ou possèdent la faculté de se déplacer pour suivre l'outil.

Avec la machine portative de M. Delaloe *(fig. 4)*, on évite l'installation de l'accumulateur et des conduites. Le compresseur est actionné soit à bras d'homme, soit plus rapidement et mécaniquement par un courant électrique, la machine ayant les dispositions *figure 85*. Cette riveuse a donné des résultats très satisfaisants dans diverses applications récentes, comportant des rivets de 25^{mm} de diamètre et des épaisseurs rivées s'élevant à près de 100^{mm} (1).

Dans les rivets de montage, le prix de la pose à la riveuse mécanique est sensiblement plus élevé que celui de la pose au marteau. Dans des travaux de ponts, la pose par le procédé mécanique revenait à 25 centimes par rivet, tandis que, par le second, le prix de revient ne s'élevait qu'à 12 centimes en moyenne.

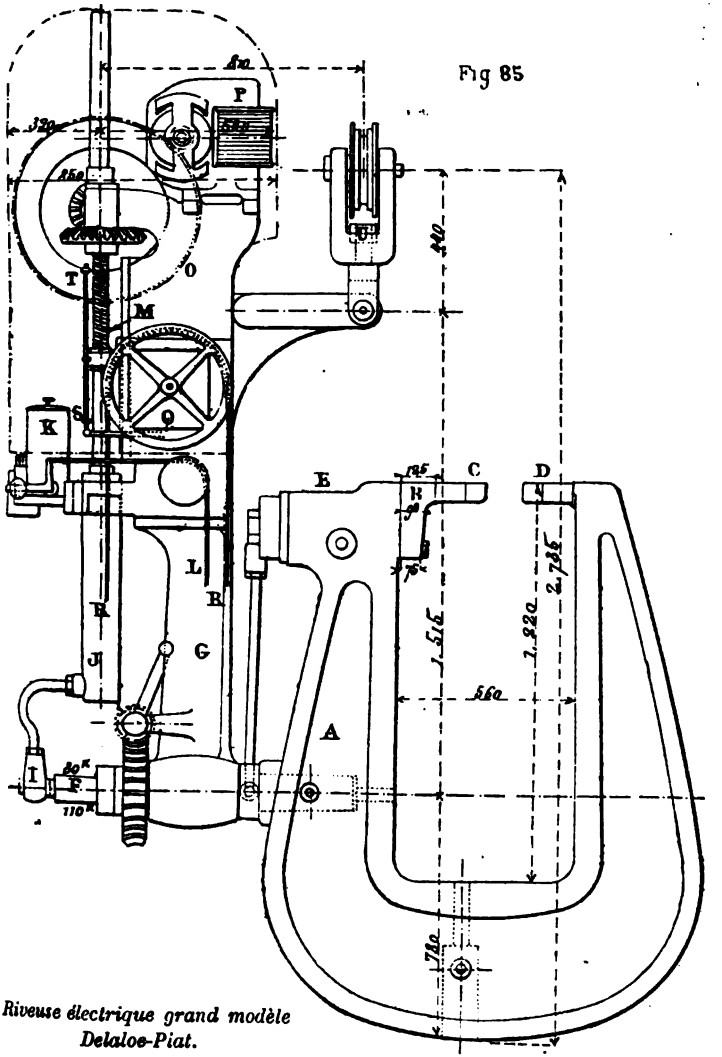
Riveuse mobile de Sellers (modèle 1891). — Les *figures 5* et *6*, *planche XXIII* (2), représentent la disposition adoptée par Sellers pour faciliter le rivetage des tubes tels que ceux de Galloway.

Les bouterolles A et B sont montées sur deux plateaux C et D adaptés aux leviers E et F. Ces plateaux tournent à

(1) Voir *Rivetage à l'électricité*, par MM. Delaloe et Piat. (*Génie Civil*, 14 janvier 1893.)

(2) Dessins extraits de la *Revue industrielle*, 10 octobre 1891, page 401.

Fig 85



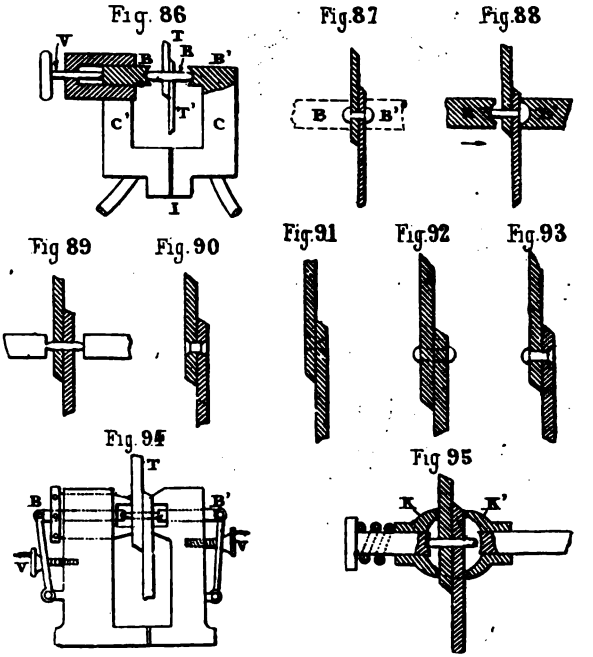
Riveuse électrique grand modèle Delaloe-Piat.

LÉGENDE : AC bâti de riveuse ; — B porte-bouterolle ; — C bouterolle ; — D contre-bouterolle ; — E manivelle d'approche à la main ; — F axe d'articulation ; — G barre de suspension ; — H roue à vis sans fin pour la commande du C ; — I joint articulé ; — J corps de pompe du plongeur ; — K boîte à eau ; — L corde pour la commande du clapet ; — M vis formant plongeur ; — F roue hélicoïdale faisant volant ; — O bâti-support de l'appareil mécanique et électrique ; — P dynamo-réceptrice ; — Q commutateur ; — R corde pour la commande du commutateur : — S taquet d'arrêt marche avant ; — T taquet d'arrêt marche arrière ; — U chape de suspension avec poulie.

volonté étant commandés simultanément par un train d'engrenages, de manière que les bouterolles ont constamment même axe et peuvent successivement être amenées en face des rivets à poser dans les divers trous d'assemblage d'une collerette.

Ces engrenages sont actionnés par une manivelle M qui peut, suivant la commodité, commander l'arbre G ou l'arbre H.

La pression hydraulique s'exerce sur le piston P solidaire



du levier inférieur F qui se rapproche du levier supérieur; ces deux leviers sont articulés en I sur une longue charnière assurant une bonne tenue contre tout déplacement latéral qui pourrait être dû à la pression de rivetage agissant en dehors du plan moyen des leviers. La distribution d'eau est commandée par le levier L. Le point de suspension est en S.

Chauffage électrique des rivets (1). — Le chauffage électrique des rivets a été proposé par Thompson (2) en faisant passer par le rivet, en position, un courant électrique d'un volume suffisant pour le chauffer à la température voulue. Le rivet est ensuite écrasé comme dans les rivures ordinaires *(fig. 86, 87, 88)*. La tige du rivet peut ne pas comporter de tête préalable *(fig. 89* et *90)*. On peut aussi faire passer le courant électrique à travers les pièces à assembler et assurer ainsi une soudure plus ou moins étendue des parties en contact *(fig. 91, 92, 93)*.

La *figure 86* montre une disposition de machine à river : le courant électrique passe par les pièces CC' isolées en I afin d'empêcher le courant de produire un court circuit. Les pièces CC' sont suffisamment massives pour ne pas trop s'échauffer. La pression sur le rivet est obtenue par une bouterolle B actionnée par une vis de poussée V. Les *figures 94* et *95* montrent une disposition avec serrage des tôles par des blocs KK' que l'on isole de la pièce en garnissant leurs faces d'appui avec du mica ou autre isolateur.

Avec le courant électrique, on peut chauffer le rivet en quelques secondes et on évite la manipulation du rivet à chaud pour l'introduire dans le trou.

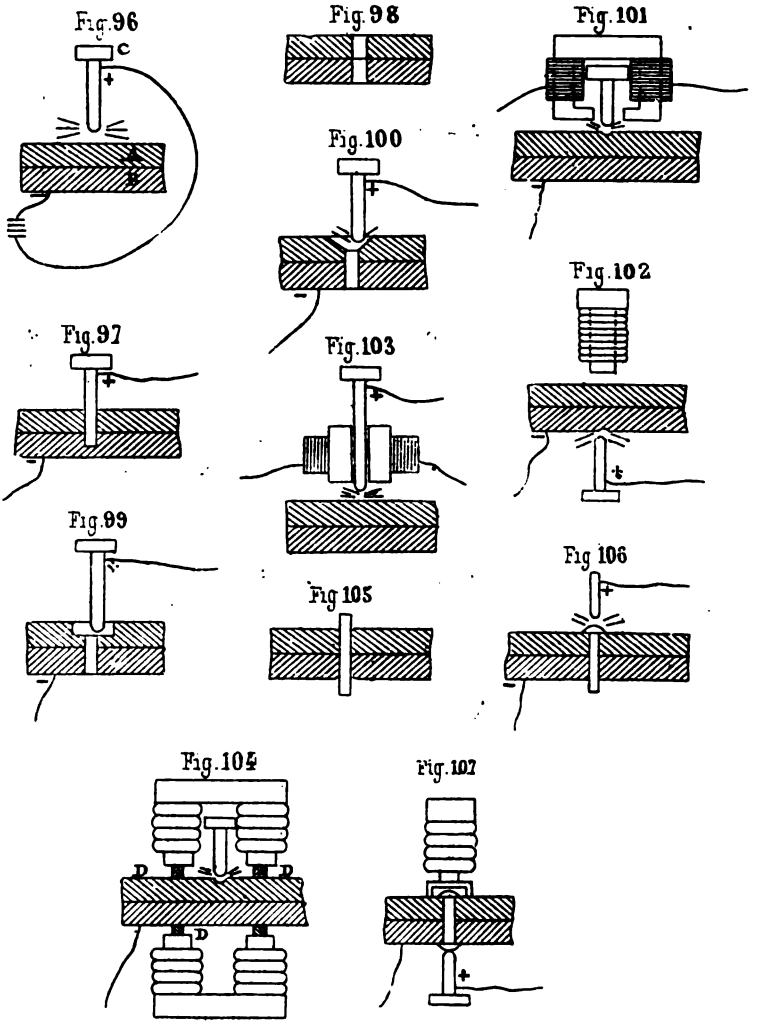
Le procédé de rivure par chauffage au courant électrique permet non seulement l'exécution de la rivure, mais aussi le perçage du trou dans les tôles (3).

S'il s'agit, par exemple, de placer un rivet *(fig. 96)*, on fixe le pôle négatif de la source d'électricité aux pièces A et B. Le pôle positif est attaché à un charbon électrique C au moyen d'un conducteur souple. Lorsqu'on approche le charbon C

(1) Comme nous n'avons pas à traiter les questions de chauffage, ce procédé n'aurait pas dû figurer ici ; cependant, à cause de sa nouveauté et parce qu'il se combine directement avec le procédé d'exécution de la machine à river, nous avons jugé bon de le signaler.

(2) Brevet du 8 janvier 1889.

(3) Brevet du 8 février 1887 à la Société pour le travail électrique des métaux.



jusqu'au contact de la pièce, le circuit est fermé. Si on éloigne alors un peu ce charbon, l'arc voltaïque jaillit et la température, si elle est suffisamment élevée, fait fondre le métal aux environs du charbon que l'on enfonce pour percer le trou *(fig. 97)*.

Pendant l'opération, on gradue l'intensité du courant de telle façon que le résultat final soit un trou à bords suffisamment lisses et à un diamètre régulier *(fig. 98)*.

Si le diamètre doit varier, on peut, par exemple, produire les formes *figures 99* et *100*.

Dans toutes les opérations, on peut rendre l'arc voltaïque tranquille et fixe sur les pièces à relier en le guidant au moyen d'un électro-aimant.

La forme donnée à l'électro-aimant-guide peut être quelconque. Cet électro *(fig. 101 à 103)* peut être ou à culasse *(fig. 101)* et agir sur l'arc voltaïque par ses pôles de nom contraire, ou creux *(fig. 103)* le charbon le traversant, ou plein *(fig. 102)* et placé de l'autre côté des pièces à river.

Suivant la forme de l'électro et la polarité de la plaque polaire agissante, l'arc peut être soufflé en s'épanouissant ou être attiré très fortement en un point des pièces à river.

Pour actionner l'électro-aimant, on l'excite à part, ou on le met en série dans le circuit de rivure, ou on le monte en dérivation sur une partie quelconque de ce circuit.

Si les pièces à river sont faites avec un métal magnétique, on interpose *(fig. 104)* des cales D en métal non magnétique entre l'électro et les pièces à river. Dans ce cas, l'électro-aimant peut constituer pour les pièces un étau magnétique les forçant à adhérer l'une à l'autre avec une très grande force; la *figure 104* montre l'électro remplissant à la fois le double rôle de guide de l'arc et d'étau magnétique pour le serrage des deux pièces magnétiques à river.

Le trou étant percé, le rivet est placé *(fig. 105)*, il dépasse un peu en haut et en bas. On fait jaillir l'arc électrique pour provoquer la fusion du métal et former la tête du rivet *(fig. 106)*.

On opère successivement de chaque côté.

Lorsque les pièces et le rivet lui-même sont magnétiques, l'opération est facilitée *(fig. 107)* au moyen d'un électro-aimant-guide et étau magnétique.

On peut remarquer qu'avec ce procédé les pièces assemblées ne sont pas énergiquement serrées, que le métal du rivet entre en fusion et perd de ses qualités mécaniques, si on ne complète pas la rivure par une pression ou un martelage des têtes, de sorte qu'il n'y a pour ainsi dire plus qu'une question de chauffage particulier, dont l'avantage ne saurait ressortir que pour des travaux de sujétion. Le perçage du trou peut, de même, être avantageux dans divers cas.

VIII. — Procédés de soudage.

L'opération de soudage consiste à réunir intimement certaines parties d'une pièce construite en plusieurs morceaux, ou en un seul présentant une solution de continuité qu'il faut faire disparaître par une soudure.

Cette opération ne constitue pas un procédé de changement de forme ni de dimensions; elle présente cependant une certaine importance dans les travaux de forgeage; elle exige des efforts de compression ou de percussion dans la confection des soudures directes, autogènes; elle exige la fusion d'un métal auxiliaire dans le cas de la soudure indirecte dite brasure, qui peut être considérée comme un moyen d'assemblage, facilitant l'exécution d'une pièce.

A ces divers titres, il y a lieu de signaler ces procédés dans cette étude générale.

Soudures directes. — Nous avons déjà indiqué qu'une compression suffisamment énergique permet de souder, d'agglutiner à froid les particules des divers métaux. La difficulté de réaliser des pressions élevées pour le soudage à froid disparaît en opérant à haute température (1).

(1) Définition extraite de l'*Encyclopédie* : La soudure n'est autre chose que la compression vive et prompte d'un morceau de fer bien chaud, sur un autre morceau de fer bien chaud.

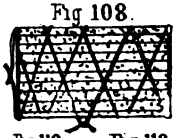


Fig 108.

Fig 109.

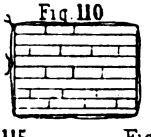


Fig.110

Fig.111

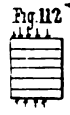


Fig.112

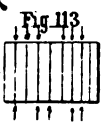


Fig.113

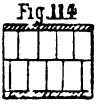


Fig.114

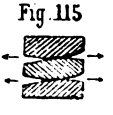


Fig.115

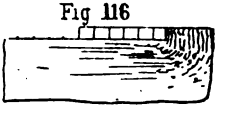


Fig 116

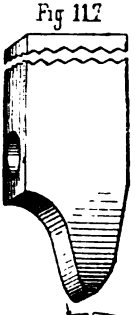


Fig 117

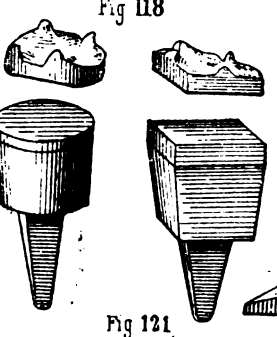


Fig 118

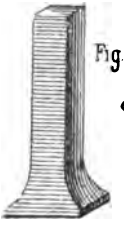
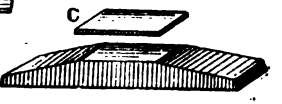


Fig 1



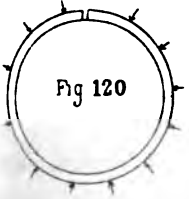


Fig 120

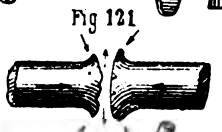


Fig 121

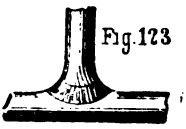


Fig.123

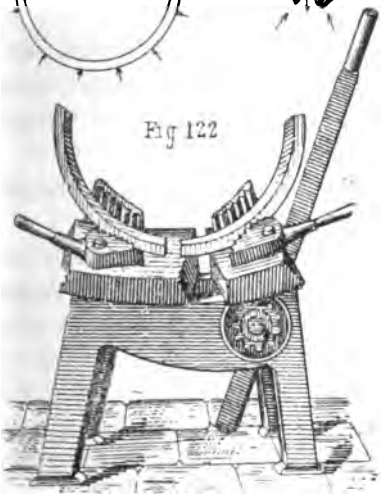
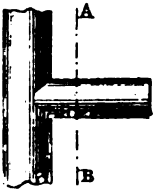


Fig 122

Fig.124

Fig 125



S'il s'agit de fer, la température convenable au soudage est d'environ 1300 à 1500°; la chauffe ou chaude est dite au blanc soudant; pour l'acier, elle est de 1200 à 1300°, suivant la nature du métal. Les autres métaux ne donnent pas lieu à des soudures directes, si ce n'est dans quelques cas exceptionnels.

Les soudures par pression simple continue sont particulièrement faites au laminoir ou en matrices pour des pièces qui ne se prêtent pas au martelage direct. La percussion est préférée dans la plupart des applications ordinaires.

On reproche à la compression de ne pas expulser les scories aussi bien que la percussion. De plus, pour quantité de pièces que l'on ne pourrait comprimer de tous côtés, le marteau permet une plus grande facilité de travail.

Souvent, on combine la compression et la percussion, la soudure se fait alors dans d'excellentes conditions.

Pour faciliter la soudure du fer et de l'acier (soit fer avec fer ou avec acier, et acier avec acier), on fait usage de poudres provenant d'un mélange fondu comprenant, par exemple : 500^{gr} de borax, 70^{gr} de sel ammoniaque, 70^{gr} de prussiate de potasse, 35^{gr} de limaille de fer non rouillée.

Ou encore, certains préconisent la composition : résine, 30^{gr}; alun, 30^{gr}; sel de cuisine, 10^{gr}; sel ammoniaque 150^{gr}; borate de soude, 300^{gr}; vitriol blanc, 20^{gr}. On ajoute parfois du sable siliceux.

L'expérience a appris que l'argile est préférable au sable pour souder l'acier; le sable vaut mieux pour le fer.

La poudre est jetée sur le métal pendant le chauffage; elle l'empêche de s'oxyder et forme un laitier favorisant l'adhérence et permettant de souder à une température relativement basse.

Au lieu d'employer ces matières en poudre, il est parfois préférable d'en constituer des plaques, dites plaques à souder, que l'on agglutine avec une toile métallique de fer très déliée.

Ce moyen a été préconisé dans ces dernières années par

M. Lafitte, qui a la spécialité d'une préparation donnant d'excellents résultats. Ces plaques sont précieuses dans bien des cas.

Selon la position des parties à réunir, les soudures se font de différentes manières qui se distinguent par quelques particularités.

Soudure en masse. — La soudure en masse ou en paquet s'applique à l'agglutination de déchets de fer ou d'acier dits riblons, tels que parties de boulons, de rivets, tiges, copeaux, ferrailles, etc., dont on forme des paquets ligaturés avec du fil de fer, les dimensions étant en moyenne $0{,}20 \times 0{,}30 \times 0{,}40$ *(fig. 108)*.

Le paquet, chauffé dans un four, est martelé au pilon sur toutes ses faces, puis étiré sur deuxième chaude pour assurer une parfaite soudure de toutes les parties.

Au lieu du pilon, le paquet passe dans un laminoir soudeur qui l'étire en le soudant. Le résultat est moins bon qu'avec le pilon.

Soudure sur plat et sur champ. — Le paquet est souvent formé de morceaux de barres découpées que l'on entre-croise ordinairement dans deux sens rectangulaires *(fig. 109* et *110)*. Les soudures des éléments se font ainsi sur plat et sur champ.

Parfois les éléments sont enchevêtrés suivant des profils qui s'emboîtent partiellement en vue d'assurer une meilleure liaison *(fig. 111)*.

Soudure sur plat. — Le paquet peut être simplement formé de morceaux superposés caractérisant la soudure sur plat *(fig. 112)*, lorsque la pression a lieu normalement aux joints.

Soudure sur champ. — Si la pression principale s'exerce parallèlement aux joints, la soudure est dite sur champ *(fig. 113)*. Celle-ci est préférable à la précédente lorsqu'on soude en cannelures au laminoir, la pression s'exerçant sur toutes les faces. Les cylindres entraînant le métal dans le sens de la longueur des barres ou mises, ces dernières avec le soudage sur plat glissent ou s'arrachent facilement dans le premier passage.

Soudure à couvertes. — En combinant les deux dispositions, la solution est meilleure *(fig. 114)*, surtout si le dessus et le dessous sont d'un seul morceau dit couverte, qui a l'avantage de masquer les lignes de joint.

Le soudage sur plat et sur toute la longueur est rarement appliqué aux pièces forgées, si ce n'est pour certains outils en fer et acier, pour pièces en étoffe. En vue de faciliter l'expulsion des battitures, des écailles d'oxyde, il convient de donner aux mises la forme arrondie *(fig. 115)*; on évite ainsi les défauts de soudure, les pailles intérieures. Cette disposition doit être adoptée dans toutes les soudures qui s'y prêtent.

Les soudures des pièces de forge sont généralement partielles ; elles se font directement ou avec des parties auxiliaires.

La soudure dite d'about ou par encollage *(fig. 117* et *118)* est adoptée pour petites pièces d'acier sur fer destinées à aciérer les parties travaillantes des outils, telles que tables de marteaux, de tas, d'enclumes.

Le morceau d'acier est strié, barbelé, pour mieux assurer la tenue au moment de l'opération qui se fait en ayant soin de chauffer d'abord la pièce de fer, de coller le morceau d'acier sur l'about, puis de réchauffer les deux pièces de telle sorte que le fer est au blanc soudant quand l'acier est suffisamment chauffé sans être brûlé ; enfin, de marteler vivement l'about et de ne marteler sur plat et sur champ que si la soudure est bonne. Cette soudure est assez difficile, à cause de la nature hétérogène des deux métaux; il convient d'employer les poudres ou plaques à souder *(fig. 119)* que l'on interpose alors que les pièces sont au blanc soudant et en exerçant au début une pression plutôt qu'une percussion.

Lorsque la surface est grande, on ne pourrait réussir la soudure avec une couverte unique, il faut opérer par éléments juxtaposés *(fig. 116)*, qui ont le grand avantage d'éviter les exfoliations si la pièce subit des chocs répétés, comme dans le cas d'une table d'enclume souvent garnie d'une couverte en

acier corroyé provenant d'un paquet composé de mises soudées sur champ.

L'encollage s'applique aussi aux tuyaux en fer *(fig. 120)*, de qualité ordinaire, qui sont soudés au laminoir suivant une génératrice. S'il s'agit de gros échantillons, les abouts sont refoulés en forme de bourrelets *(fig. 121)*, la surface est striée à la tranche, la soudure est faite en martelant tantôt sur les bouts ou longitudinalement, tantôt transversalement sur les bourrelets. Il ne faut pas trop arrondir les bourrelets afin de laisser suffisamment de prise aux parties en contact.

Dans cette soudure, le résultat est meilleur en opérant à la machine à souder *(fig. 122)*, variante de la machine à refouler, qui développe des pressions longitudinales, tout en frappant transversalement avec le marteau.

L'encollage est encore appliqué aux pièces qui se rencontrent angulairement *(fig. 123* et *124)*; il faut toujours qu'à l'endroit de a soudure, il y ait un renflement pour compenser le déchet de métal dû à la chaude et au martelage qui réduisent les dimensions transversales.

Quelquefois le renflement de l'une des pièces est à cuvette *(fig. 123)*; il y a lieu de craindre l'interposition d'écailles d'oxyde. Avec l'emploi des plaques Lafitte on obtient des soudures par encollage ne laissant pour ainsi dire rien à désirer. Par exemple, on cite la soudure d'un bras de levier sur un arbre *(fig. 125)*, dans les conditions suivantes: l'arbre était supposé fini d'ajustage et n'a pas été chauffé au delà du rouge cerise clair pour ne pas l'endommager.

Le bras de levier à rapporter a été chauffé légèrement suant.

La soudure a été faite d'une seule chaude et n'a laissé aucune trace d'amorce.

A l'essai, la rupture s'est produite en AB à 20^{mm} du corps de l'arbre, c'est-à-dire en dehors de la soudure,

On voit que, dans certains cas, ce procédé est précieux.

La soudure par encollage est quelquefois appliquée pour la

réunion de fonds de récipients cylindriques avec les parois latérales.

On commence par évaser *(fig. 126)* la paroi cylindrique C de manière à y emboîter exactement le fond F un peu à force.

La soudure se fait successivement en prenant grand soin de ne pas trop déformer les pièces, et en rétablissant la forme cylindrique primitivement évasée, ce qui fournit du métal à la soudure et donne lieu à un bourrelet prononcé *(fig. 127)*, qui devrait former raccord assurant la résistance, mais qui donne ordinairement un point faible précisément à la section de rupture pour les récipients soumis à des pressions intérieures. En effet, le bourrelet intérieur laisse toujours un angle aigu non soudé, qui constitue un commencement de déchirure; de plus *(fig. 128)*, les surfaces de soudure restent trop nettes, il n'y a pas liaison des fibres du métal, l'adhérence est faible, il y a chances nombreuses de défauts.

Les soudures par encollage nécessitent plusieurs chaudes; elles sont peu solides, les fibres du fer ne sont pas enchevêtrées, elles doivent être évitées autant que possible. Une soudure de ce genre peut être de bonne apparence, sans trace de solution de continuité, et néanmoins n'avoir qu'une faible résistance au décollement tout en ayant donné beaucoup de recouvrement. Les soudures bout à bout doivent être prohibées pour n'importe quelle pièce subissant des efforts qui tendent à séparer les parties.

Une autre soudure d'about est celle dite en *gueule de loup (fig. 129)*, adoptée pour aciérer les extrémités des outils tels que les tranches ou les pannes des marteaux. La pièce étant fendue, on la chauffe légèrement suant, puis plaçant le morceau d'acier barbelé, on referme l'entaille et l'on se hâte de pousser le feu et de chauffer jusqu'à ce que l'acier soit au rouge, le fer étant alors au blanc soudant permettant d'opérer la soudure. Le fer est placé à l'extérieur, parce qu'il résiste mieux à la chaleur que l'acier.

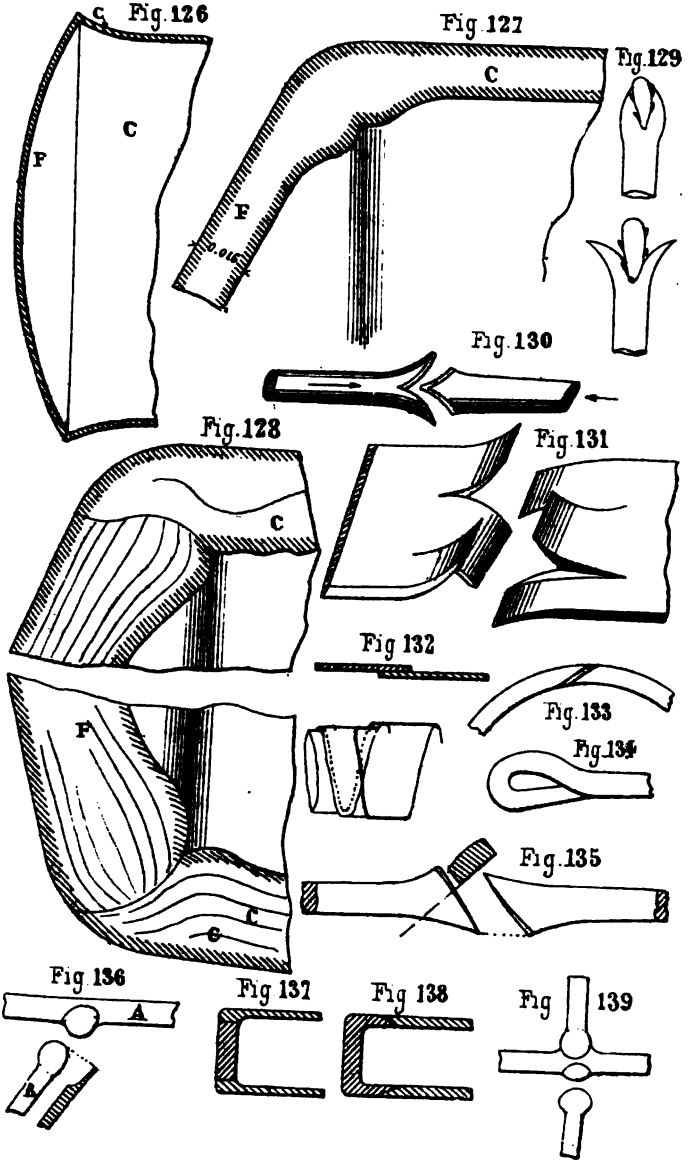


Fig.126
C
C
F
Fig.127
C
F
Fig.129
Fig.130
Fig.128
C
Fig.131
Fig 132
Fig.133
Fig.134
F
C
C
Fig.135
Fig 136
A
Fig 137
Fig 138
Fig 139

Cette soudure est aussi appliquée pour la réunion de pièces cylindriques. L'about de l'une des parties est fendu, après refoulement convenable; l'autre partie a son extrémité amincie et s'engage dans la fourche *(fig. 130)*. Le martelage transversal oblique aux faces inclinées a pour effet de faire glisser les parties, il faut marteler en bout à diverses reprises pour bien assurer la prise.

Lorsque la pièce est plate et large, la soudure à *languettes croisées* convient si l'épaisseur est faible *(fig. 131)*.

Le plus souvent, pour les minces épaisseurs, la soudure est à simple recouvrement *(fig. 132)*, dont la largeur peut varier de quelques millimètres à un centimètre suivant l'importance de l'épaisseur. Ce procédé s'applique, par exemple, aux tubes en fer ou en acier formés d'une bande enroulée en hélice avec bords à recouvrement.

Dans cette soudure, les saillies des abouts se soudent difficilement, laissent une trace, une paille que l'on évite avec la *soudure en sifflet (fig. 133)* dite aussi *soudure par amorces*, qui est la plus employée. L'extrémité de chaque pièce est simplement amincie en sifflet si l'épaisseur est faible, par exemple dans les bagues, les cuissards de chaudières, etc., dans les tuyaux en fer ou acier que l'on soude au laminoir ou au marteau lorsque la pièce est chauffée à l'électricité.

La *figure 134* montre une autre application de la soudure en sifflet sur plat pour pièce à œil ou pour pièce repliée. Avec des épaisseurs et des pièces permettant de refouler les extrémités, il est préférable de former un bec renflé ou amorce présentant une section transversale légèrement bombée *(fig. 135)*, pour faciliter l'expulsion des oxydes.

Dans une première chaude, les deux parties sont soudées; par une deuxième chaude, on complète la soudure et on ramène la pièce à ses dimensions normales.

La machine à refouler est toujours d'un excellent usage pour maintenir les amorces contre le déplacement longitudinal.

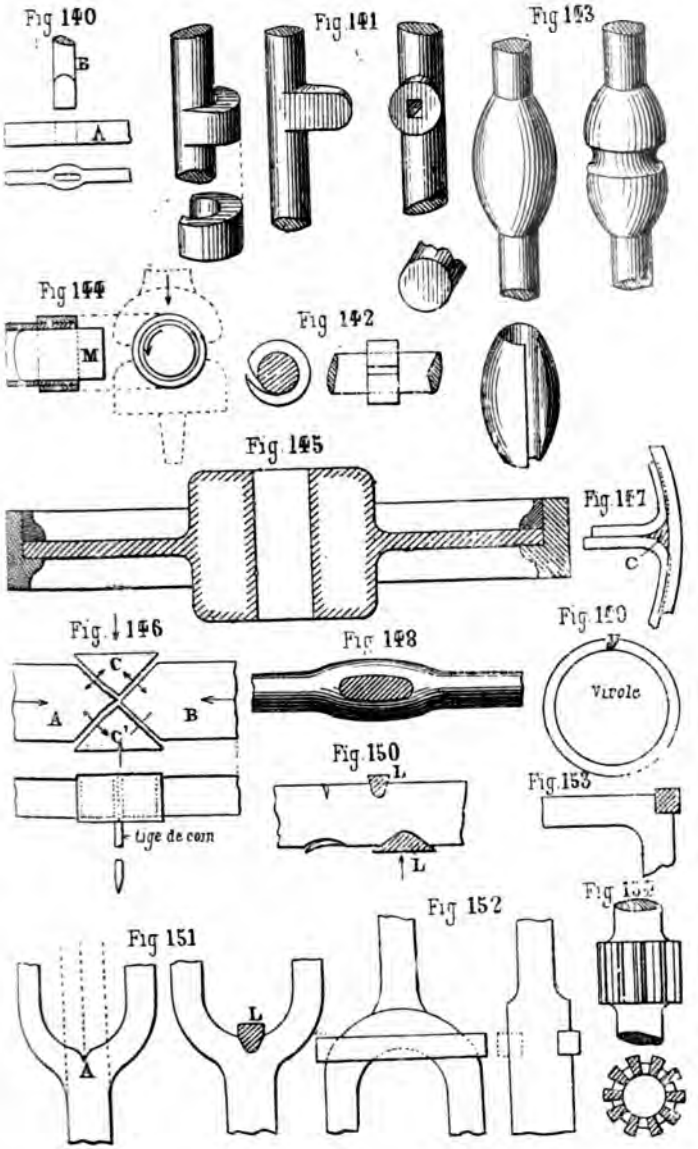


Fig 140
B
A
Fig 141
Fig 143
Fig 144
M
Fig 142
Fig 145
Fig 147
C
Fig 146
C
A
B
C'
tige de com
Fig 148
Fig 149
V
Virole
Fig 150
L
L
Fig 153
Fig 151
A
L
Fig 152
Fig 154

La soudure à amorces, de même que les autres, est généralement incertaine et constitue un point faible d'une pièce; souvent même une soudure difficile à réussir est une cause probable de rupture. Les essais de rupture par traction montrent que la résistance de la partie soudée est moyennnement les cinq sixièmes de la résistance des parties non soudées. Cependant une soudure bien réussie présente une résistance égale à celles des parties non soudées. Dans les soudures à recouvrement, il ne faut pas exagérer les surfaces de soudage afin de réduire les chances de défauts pouvant déterminer le décollement des parties.

Les amorces sont aussi adoptées pour les pièces obliques ou à angle droit. Sur la pièce A *(fig. 136)* est ménagée une amorce de côté, la pièce B présente une amorce d'extrémité qui s'applique sur la précédente.

S'il s'agit d'une chape, il faut éviter les soudures par encollage *(fig. 137)* en soudant par amorces les branches de la chape *(fig. 138)* à une tête en ⊓ .

Quand les pièces se rencontrent pour former un croisillon *(fig. 139)*, deux des bras sont soudés avec les deux autres formés d'une seule pièce diamétrale présentant des amorces de côté.

Parfois la soudure est à *emboîtement partiel (fig. 140)*, la pièce B traverse la pièce A percée à cet effet; la liaison est ainsi meilleure si des paillettes d'oxyde ne se sont pas opposées à la soudure. L'emboîtement est latéral *(fig. 141)* pour le soudage de parties cylindriques.

Les renflements de pièces cylindriques se soudent aussi par emboîtement. Ainsi, les portées et collets des arbres, les têtes de boulons, lorsque ces parties ne sont pas refoulées, sont obtenues en enroulant une bande à abouts amorcés *(fig. 142* et *143)* ne se rejoignant pas avant l'opération afin que l'allongement subi par la bande lors du soudage au marteau ne produise pas de gondolement empêchant une bonne exécution.

Si c'est une bague de tube, celle-ci est formée, au préalable, par une bande enroulée et soudée par amorces; le bout du tube est calibré, tourné un peu conique. La bague et le tube sont soudés à l'étampe *(fig. 144)*. On a soin d'emmancher dans le bout du tube un mandrin M pour empêcher la déformation, et pendant que l'on frappe sur l'étampe à petits coups, un manœuvre fait tourner le tuyau.

Les pièces cylindriques telles que la toile d'une roue de wagon et sa jante donnent lieu à des soudures sur emboîtement disposées comme *figure 145*. La jante présente un rebord d'appui de la toile, une bague est rapportée du côté opposé. Il convient de porter la pièce entière à la chaleur soudante à l'exception toutefois du moyeu qui reste moins chaud. Le soudage se fait en matrices finisseuses de la pièce, de manière à produire des pressions dans tous les sens assurant ainsi la soudure complète.

Quand on ne peut facilement ménager du métal en excès ou confectionner des amorces, on adopte la soudure *à coins (fig. 146)*.

Les extrémités des pièces A et B sont terminées par deux faces inclinées permettant de placer deux coins CC'. Pendant la soudure, le martelage des coins détermine sur les faces inclinées des pressions favorables à la prise du métal. Il va sans dire que les pièces A et B sont convenablement maintenues contre tout déplacement. Pour tenir chaque coin on le munit d'une petite tige qui est détachée après la soudure.

Cette soudure peut s'appliquer aux bandages, jantes de roues, rais soudés en masse. Les coins dits *lardons* sont aussi employés pour renforcer des pièces, pour garnir des vides, tels que celui C *(fig. 147)*.

Ainsi, quand on ne peut refouler une pièce parce que sa longueur ne saurait être modifiée, un lardon L permet de la renfler à l'endroit voulu *(fig. 148)*. La pièce est fendue, ouverte suivant les fibres du métal; un lardon est enfoncé à force et soudé.

Les viroles se soudent parfois par pièce rapportée *(fig. 149)*, en chanfreinant les bords légèrement. Il y a deux surfaces ou joints de soudure, tandis que par recouvrement des pinces chanfreinées, il n'y a qu'un joint.

Parfois le lardon est employé pour faire disparaître une crique, une paille profonde *(fig. 150)*, pour renforcer une pièce à un endroit où les parties tendent à s'ouvrir en raison de leur forme et des efforts qu'elles subissent. Par exemple, dans le cas d'une fourche *(fig. 151)* obtenue en fendant l'extrémité d'une barre et en écartant les branches. Les efforts de poussée tendent à produire une déchirure en A; il est donc bon de souder à cet endroit un coin ou lardon L renforçant la naissance des branches. Pour obtenir une bonne soudure, il est nécessaire d'agrandir le vide à boucher. Au lieu d'un simple coin, il est préférable de souder transversalement et de chaque côté, une pièce qui s'étend sur toute la largeur *(fig. 152)*, après avoir préalablement entaillé un peu la pièce. La soudure se fait au rouge cerise avec une plaque Lafitte et au marteau-pilon à double effet qui agit d'abord comme une presse, puis à petits coups. Une deuxième chaude au rouge cerise est donnée pour bien assurer l'opération. Ensuite, on prépare l'autre côté pour y faire une soudure analogue. La pièce ne se déforme pas et est remise en état de bon usage. Ce procédé est aujourd'hui couramment adopté dans les ateliers de réparation des bielles de locomotives.

De même, pour former l'angle d'une pièce en équerre, on peut souder un lardon *(fig. 153)*. S'il s'agit de renforcer une portée d'arbre cylindrique *(fig. 154)*, les lardons sont enchâssés dans des rainures pratiquées dans la portée, puis on soude.

Lorsqu'une pièce comporte une série d'éléments soudés entre eux deux à deux, le travail de soudure isolée est long et difficile ; il est préférable d'opérer en une seule chaude pour toutes les soudures, qui se font alors en matrices, comme, par exemple, pour le soudage des divers éléments d'une roue de wagon.

Fig 155

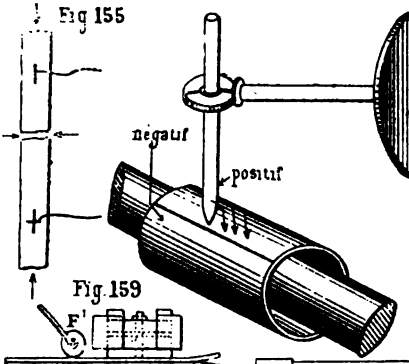


Fig 156

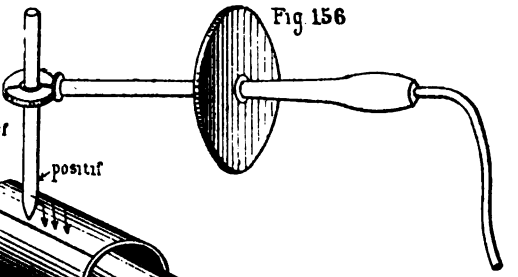


Fig 159

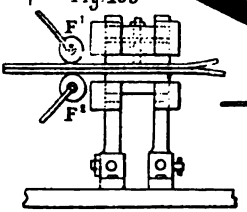
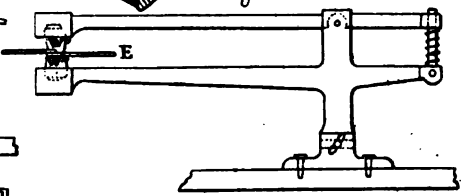


Fig 160



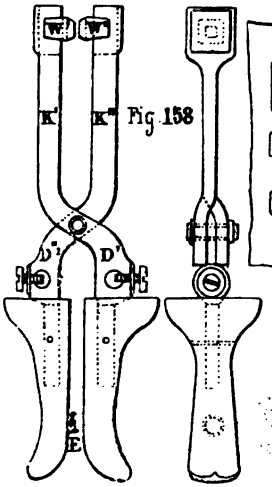


Fig 158

Fig 161

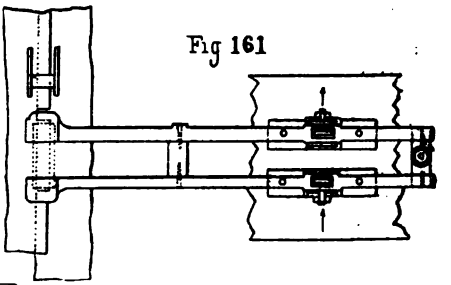
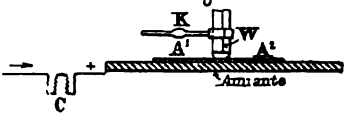
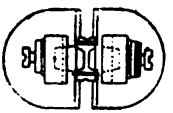


Fig 157





Procédé de soudure par frottement. — En développant au contact des parties à souder un frottement suffisamment énergique pour porter le métal à la température nécessaire, on conçoit qu'avec la pression produisant le frottement, les parties puissent se réunir sans martelage ou pression supplémentaire. Ce procédé a été appliqué pour la soudure de tiges et celle des tuyaux (1). Les bouts des tiges, découpés en biseau, sont fixés dans un manchon que l'on place entre les deux pointes d'une machine spéciale tournant à grande vélocité; le frottement qui se produit entre la paroi intérieure du manchon et les bouts de la tige, tournant en sens contraire, amollit ceux-ci qui se soudent complètement sans qu'il soit utile d'interposer un corps soudant quelconque.

Il semble que ce procédé doive être peu sûr, d'un prix de revient élevé et qu'il ne saurait s'appliquer qu'à des cas particuliers.

Soudage à l'électricité.

L'emploi de l'énergie électrique ne constitue un procédé de soudage qu'autant que les parties à réunir se lient par fusion directement ou par brasure.

Or, il convient le plus souvent de marteler les soudures, de sorte que l'opération n'est plus qu'un procédé de chauffage, permettant de concentrer la chaleur en un point donné.

On peut distinguer plusieurs procédés d'utilisation du courant électrique. Nous citerons ceux d'Elihu Thomson, de Bénardos, de Bernardos.

C'est Thomson qui, le premier, appliqua (vers 1880) l'énergie électrique au chauffage et à la soudure des métaux par fusion.

Ces procédés ne sont pas encore très répandus; ils ont donné lieu à quelques mécomptes de début.

Cependant, les perfectionnements apportés aux dispositions auxiliaires d'outillage; le concours d'un personnel exercé aux

(1) Procédé Bevington. *Der praktische Maschinen. Construct.*, 14 avril 1892.

tours de mains; l'application industrielle dans quelques établissements, tels que ceux de Lloyd et Lloyd en Angleterre, ont fait entrer ces procédés dans la pratique, pour l'exécution de certaines pièces.

Le procédé d'Elihu Thomson repose sur la loi de Joule : le courant électrique développe de la chaleur dans le circuit qu'il parcourt, proportionnellement à la résistance qu'il rencontre et au carré de son intensité. L'énergie électrique est transformée en énergie thermique.

Si deux tiges de fer sont reliées *(fig. 155)*, l'une au pôle positif, l'autre au pôle négatif d'une source électrique, et si les tiges sont en contact, la solution de continuité entre les surfaces détermine une résistance telle que si le courant est suffisamment intense, les métaux sont portés à la surface de contact à la température de fusion ou soudante qui permet, par un martelage ou une compression, de réunir les pièces, de les souder.

Les appareils permettent de régler le courant à volonté suivant l'importance des soudures. Les pièces sont mises en contact par le serrage de mâchoires appropriées qui agissent mécaniquement. L'énergie nécessaire varie avec la nature du métal, sa température et les dimensions des pièces. Ainsi, pour souder deux tiges d'acier de 25^{mm} de diamètre, l'énergie est d'environ 23^{chvx}; pour deux tiges de 12^{mm}, il faut environ 6^{chvx}. Le courant, qui ne dure qu'un temps très court, doit avoir une grande intensité et une très faible force électromotrice. On fait emploi d'un transformateur. Dans diverses applications, l'appareil est disposé de manière qu'un courant alternatif moyen de 20 ampères et de 600 volts dans la bobine primaire donne 1 volt et 12.000 ampères dans la bobine secondaire.

Le procédé Thomson est particulièrement appliqué au soudage en bout des barres, leviers, arbres, rails, soit à des pièces de dimensions assez grandes.

Le procédé de Bénardos proposé peu après celui de Thomson est basé sur l'emploi de l'arc voltaïque au moyen d'un

charbon pour porter le métal à la température voisine de la fusion.

Le porte-charbon *(fig. 156)* comporte un manche de bois traversé par le câble amenant un courant continu; d'une tige métallique terminée par un œillet servant à maintenir le charbon, d'un disque métallique revêtu d'une couche d'amiante sur la surface orientée vers l'opérateur, pour le préserver des dégagements d'étincelles du foyer incandescent.

Le chauffage se fait par parties si la longueur à souder est grande (par exemple, s'il s'agit d'un tuyau); puis chaque partie est martelée vivement pour assurer la soudure et donner de l'homogénéité au métal.

Appliqué en premier lieu à la soudure d'objets en plomb, le procédé a été préconisé pour le soudage des tubes, des viroles en fer ou en cuivre.

La pièce à souder est placée sur un support isolé; l'ouvrier soudeur est logé dans une petite cabine à fenêtres en verre rouge, afin de garantir les yeux des autres ouvriers de l'atelier contre l'éblouissement dû à la lumière excessivement vive de l'arc, dont le pôle positif est constitué par le charbon, le pôle négatif de la source d'électricité étant relié aux objets à souder. Le courant peut avoir une force électromotrice de 80 à 100 volts ou plus et une intensité pouvant atteindre 1000 ampères.

Des deux procédés de soudure électrique précités, celui de Bénardos sur l'emploi de l'arc électrique, et celui de Thomson sur l'échauffement produit par le courant électrique, le dernier paraît donner la meilleure solution pratique.

Le chauffage électrique rend possible, dans le travail des métaux, des soudures considérées comme impraticables dans un feu de forge ordinaire. Il peut être employé pour souder des tiges cassées, sans altérer les autres parties avoisinantes, pour souder aisément des fers profilés, des rails, des formes complexes.

Les divers métaux : cuivre, laiton, etc., se soudent également d'une façon directe.

Soudure électrique, procédé Bernardos. — M. Bernardos pro-

duit la soudure électrique (1) en mettant les pièces en contact avec un corps réfractaire au feu et relativement mauvais conducteur de l'électricité (graphite, charbon préparé), pendant que ce corps est traversé par un courant électrique puissant qui communique au métal la température nécessaire pour le genre de travail. Ce procédé peut servir à souder des tôles ou des barres minces, à porter les pièces à une température de trempe, à amener des objets trempés à une température de recuit. Ce procédé est encore une application de la loi de Joule.

Pour souder entre elles des tôles minces, on les relie par un câble flexible à l'un des pôles d'une source énergique d'électricité à résistance électrique intérieure faible. A l'autre pôle est relié un fer à souder K *(fig. 157)*; ce fer à souder est principalement constitué par un métal très bon conducteur de l'électricité (cuivre) et porte à son extrémité inférieure une petite pièce W de la matière réfractaire; c'est avec cette dernière qu'a lieu l'échauffement. Le corps du fer à souder est pourvu d'une poignée qui protège la main de l'ouvrier contre les effets de la chaleur et de l'électricité.

Dès que la partie W touche les pièces métalliques A^1, A^2, le circuit électrique se trouve fermé et une partie importante de l'énergie électrique est transformée en chaleur dans le mauvais conducteur W qui devient incandescent.

En enlevant de la résistance du circuit électrique au moyen d'un rhéostat C *(fig. 157)*, la température de la pièce W est poussée ou augmentée jusqu'à ce que le métal en travail commence à fondre. On déplace ensuite, sous une pression modérée, soit le fer à souder le long de la soudure à effectuer, soit la pièce de métal sous le fer à souder fixe.

Lorsque le travail est achevé, on interrompt le courant par un commutateur et l'on éloigne le fer à souder du métal.

Pour donner aux pièces de métal à travailler un appui

(1) Brevet du 21 avril 1888.

résistant, on les pose sur un support réfractaire mauvais conducteur de la chaleur (amiante).

Dans certains travaux, il est préférable d'employer deux fers à souder opposés, reliés l'un au pôle positif, l'autre au pôle négatif de la source d'électricité, les deux fers à souder étant isolés l'un de l'autre.

La *figure 158* réalise cette disposition : deux fers à souder K′ K″ sont articulés et isolés sur leur axe de liaison. Les pinces D′, D″ reçoivent les extrémités des câbles reliés aux pôles de la source d'électricité. Le courant passe ensuite de D′ en W′ par K′ de la pièce réfractaire W′ à travers le métal à travailler en W″ et retourne par K″ et D″ à travers un rhéostat à la source d'électricité.

Les manches en bois des deux fers à souder sont reliées par un ressort E pressant les deux têtes l'une vers l'autre.

Les *figures 159*, *160* et *161* représentent un dispositif qui se distingue des précédents en ce que le courant ne passe pas à travers le métal en œuvre. Le fer à souder est constitué par une substance mauvaise conductrice, parcourue par le courant électrique de la même manière que le filament d'une lampe à incandescence. Entre les deux pièces W^1W^2 portées à l'incandescence, on place les pièces à souder E, soit à la main, soit au moyen de deux galets F^1F^2. Cette disposition a l'avantage de pouvoir ouvrir la pince ou d'enlever le métal en œuvre du dispositif soudeur même sans interrompre le courant, et sans qu'il se produise d'étincelle électrique ou d'arc électrique entre le métal et l'appareil à souder.

Comme application de la soudure électrique, citons la liaison des rails sur la voie. Les longueurs actuellement données aux rails atteignent de 12 à 24^m. De plus grandes longueurs sont obtenues, mais elles sont difficiles à manier. Pour réduire le nombre de solutions de continuité, on a proposé et réalisé (1)

(1) *Génie civil*, 4 novembre 1893, page 6. Essais effectués à Cambridge ur des rails de tramways. 25 kilomètres de rails ont été soudés par le

la soudure des abouts sur place en chauffant les extrémités par le courant électrique.

Les abouts étant meulés sur place, une mince pièce d'acier de même section que celle du rail est chassée à force entre les deux abouts. Puis le courant électrique, emprunté par un trolley aux fils placés au-dessus de la voie, chauffe les parties à souder qui se réunissent par compression.

La machine électrique reçoit le courant continu à 500 volts et le transforme en un courant alternatif à la tension de 500 volts. Ce courant passe par un transformateur qui le ramène à une tension de 4 volts à 40.000 ampères, puis il arrive aux rails à réunir. Le courant produit une chaleur suffisante pour porter le métal au blanc soudant en deux ou trois minutes.

Avec le courant électrique, le chauffage est devenu pour ainsi dire une opération mécanique dans toute l'acception du mot. Les appareils qui conduisent le courant sont armés d'outils qui constituent, dans le cas de soudure, de véritables machines complètes à souder.

Nous pouvons ajouter que le courant électrique chauffe aussi les pièces à haute température, dans des bains liquides, déterminant le procédé hydro-électrothermique qui peut s'appliquer à la plupart des travaux de forgeage (1).

Il consiste à transformer l'énergie électrique en énergie chimique, cette dernière étant ensuite transformée en énergie calorifique. La première opération est donc une électrolyse, la seconde est la combinaison chimique des éléments obtenus.

L'électrolyte consiste en une solution de sel de soude dont le poids spécifique est de 1,306 à 29° centigrades, ou en une

---

chauffage à l'électricité, procédés Thomson. Cette excellente idée de souder les rails devrait être appliquée tout particulièrement aux parties des voies sur les ponts, de manière à supprimer les chocs qui déterminent des oscillations fatiguant beaucoup les éléments des ponts.

(1) Ce procédé a été signalé par MM. Lagrange et Hoho, il y a quelques années. M. Burton, de Boston, l'a fait breveter dernièrement avec une série d'appareils accessoires.

solution d'égales parties de sel de soude et de crème de tartre d'un poids spécifique de 1,255 à 25° centigrades; ou encore, d'une solution de carbonate de soude et de borax dans la proportion de 3/4 d'eau pour 5,436^{kg} de carbonate de soude et 453 grammes de borax.

La surface de contact de l'anode avec le liquide est beaucoup plus grande que celle de la pièce à chauffer.

Cette plaque est en plomb, en cuivre ou en une autre matière conductrice convenable; elle est de préférence de forme angulaire, une partie reposant sur le fond du récipient et l'autre étant parallèle avec le bord supérieur.

La pièce est plongée dans le bain librement ou placée sur un support dont la surface est normalement au-dessus du bain.

Ce support est constitué par une matière non conductrice, comme de la pierre, de la terre réfractaire ou mieux de l'ardoise. La surface du support est striée ou cannelée, ce qui permet au liquide d'être en contact avec toutes les faces du métal et à la couche gazeuse incandescente d'envelopper entièrement ce dernier. Le voltage du courant employé est de 120 à 500 volts et l'intensité de 6 ampères et au-dessus, selon les dimensions ou le volume de la pièce. Pour le soudage, une puissance de 45 kilowats serait suffisante pour chauffer les pièces d'environ 0^{m},25 de diamètre en 40 secondes, prêtes à être martelées. Deux équipes de forgerons peuvent être occupées à ce travail avec un bain. Un point important pour le soudage réside dans le fait que la chauffe du métal se produit dans une atmosphère de gaz hydrogène, où il n'y a ni impuretés, ni scories, et que le métal sort du bain parfaitement propre pour obtenir une soudure parfaite. Il convient particulièrement, pour souder une petite pièce avec une grosse, on peut ne chauffer que l'endroit où se fait la soudure. On peut régler à volonté la chauffe par l'augmentation ou la diminution de la force électromotrice du circuit. Pour le chauffage de trempe des aciers, l'électrolyte comporte une solution de carbo-

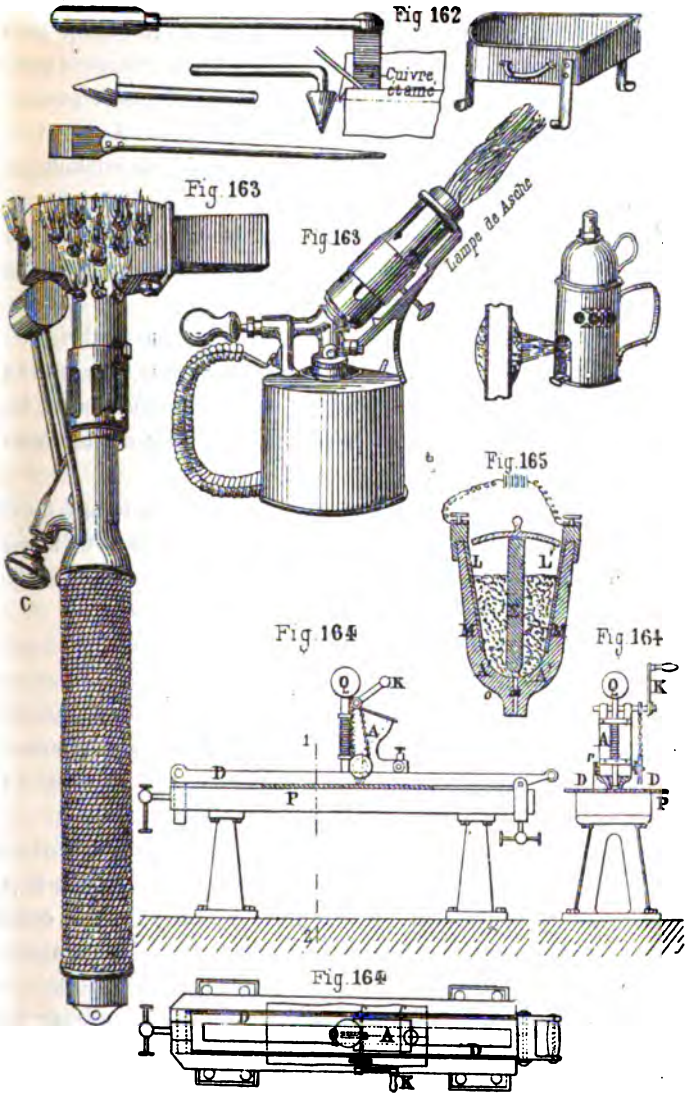


Fig 162
Cuivre étamé
Fig 163
Fig 163
Lampe de Arcole
Fig 165
L
L'
M
M'
C
Fig 164
Fig 164
Q
K
A
D
P
Fig 164
D
A
K

nate de potasse dans de la glycérine substituée à l'eau. La chauffe est alors moins rapide et se contrôle mieux qu'avec des solutions aqueuses. Ce procédé de chauffage convient pour toutes pièces ordinaires; diverses forges l'appliquent avantageusement au soudage des essieux de voitures. Lorsque la solution du bain est très étendue, la quantité de chaleur est très faible; on peut faire rougir, par exemple, des fils de 2 à 3^{mm} de diamètre. En solution concentrée, au contraire, un fer rond de 18^{mm} fond plus vite que dans le plus ardent feu de forge.

Brasage. — La soudure dite brasure est obtenue par la fusion d'un métal auxiliaire interposé entre les parties à réunir. La solidarité est simplement due aux effets d'adhérence entre les métaux par rapprochement sous faible pression et sans martelage.

L'opération se fait sur certaines pièces à la température ordinaire; sur d'autres, elle se fait à une température élevée, soit celle de fusion du métal auxiliaire, qui est du plomb de l'étain ou un alliage formé de

$$\frac{48 \text{ parties de zinc}}{52 \text{ de cuivre}} \text{ à } \frac{75 \text{ parties de zinc}}{25 \text{ de cuivre}};$$

parfois on ajoute un peu d'étain à cet alliage, préparé en grenaille, et s'appelant improprement brasure. Suivant la teneur en cuivre, le point de fusion s'élève; la soudure étant faite à température plus haute présente plus d'adhérence.

Ce procédé de soudure est appliqué à des pièces plus ou moins achevées, qu'il convient de ne pas marteler. Les petites pièces délicates en fer, en cuivre, se soudent à l'étain; celles devant présenter de la résistance se soudent avec de la brasure, par exemple les tuyaux, les brides de tuyaux, les viroles.

La soudure au plomb n'est guère employée que pour les tuyaux de plomb.

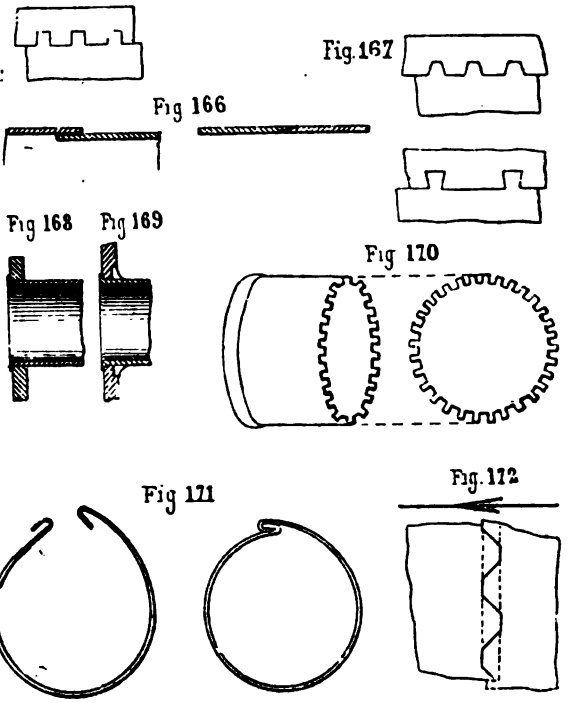
Les soudures au plomb et à l'étain se font en ayant soin de bien décaper à l'acide les parties à réunir et souvent ces parties

sont étamées au préalable. Puis leur rapprochement au plus près étant maintenu, on fait fondre la soudure en baguette au moyen d'un fer à souder *(fig. 162)* chauffé au rouge dans un fourneau, et en chauffant les parties à souder au moyen d'une lampe à alcool, à une température qui facilite la prise. Le fer à souder et la lampe de Asche à l'huile minérale *(fig. 163)* sont d'un bon emploi. On fait aussi usage d'un chalumeau à gaz dont la puissance permet d'opérer sur l'alliage de cuivre et de zinc, sans nécessiter le chauffage de la pièce dans un four ou sur un feu de forge lorsqu'il s'agit, par exemple, d'un tuyau. Pour braser une pièce de fer ou de cuivre, on a soin de limer, de décaper, de garnir les parties de borax ou de poudre à souder, et de chauffer sur un feu bien clair au rouge vif; la brasure, mise en quantité, fond et coule dans les interstices, puis on refroidit lentement; les pièces sont ensuite nettoyées, raclées. Avec l'arc électrique, la soudure se fait rapidement, la fusion est locale; il suffit de promener le charbon sur les parties à réunir.

M. de Bénardos a combiné un soudeur électrique *(fig. 164)* (1) chauffant les parties à joindre et faisant fondre du métal dans un creuset pour le couler sur la soudure, de façon à favoriser l'union intime. L'appareil soudeur comporte en outre un marteau qui agit à mesure que l'ensemble se déplace pour atteindre, par exemple, les divers points de la soudure de deux tôles P. Le marteau Q est actionné mécaniquement ou à la main. Pour la fusion du métal, le courant est de faible intensité, mais de grande force; le réglage est opéré au moyen de rhéostats. Le creuset *(fig. 165)* formé d'une matière réfractaire, est muni d'une cloison E également réfractaire et non conductrice de l'électricité, qui le divise en deux compartiments dont chacun est revêtu à l'intérieur d'une plaque métallique LL'. Les plaques sont pourvues de bornes *ll'* pour l'attache des fils venant de

(1) Brevet du 9 janvier 1892.

la source du courant. Quand le circuit est fermé, le courant passe de la borne *l* par la plaque positive L, traverse le métal chargé dans un compartiment, puis passe par le métal de l'autre, par la plaque négative L′ à la borne *l′* et revient à



la source. La résistance rencontrée vers le bas de la cloison E fait fondre le métal qui s'écoule par l'orifice O. Ce procédé peut avantageusement être employé pour le remplissage des défauts tels que fissures, soufflures, pour les soudures étanches des récipients de faible épaisseur, tels que les fûts, les tonneaux, réservoirs à pétrole, huile, alcool.

Les pièces sont brasées sur parties à simple recouvrement, ou sur lèvres en sifflet *(fig. 166)*.

Pour augmenter la solidité, souvent elles s'emboîtent partiel-

lement sur languettes droites, obliques, ou sur languettes à queue d'hironde *(fig. 167)*.

Si les pièces sont cylindriques, l'emboîtement étant complet et d'about, l'extrémité de la pièce emboîtée est rabattue *(fig. 168)* et s'il s'agit, par exemple, d'une bride de tuyau, on a soin de ménager un congé de raccord prononcé *(fig. 169)*. Si c'est un fond de récipient *(fig. 170)*, on adopte la brasure sur languettes multiples.

Les pièces de mince épaisseur sont encore brasées sur agrafe *(fig. 171)* donnant ainsi une plus grande résistance si l'assemblage s'applique à des tuyaux soumis à des pressions intérieures.

Parfois l'une des bandes ou pinces de recouvrement est fendue en languettes, l'autre pince est placée entre les languettes rabattues de chaque côté de manière à saisir l'une des pinces par l'autre *(fig. 172)*. Afin de réduire l'épaisseur de la jonction, les pinces sont amincies (1).

IX. — Perçage.

Le forgeage des pièces conduit parfois au perçage de certaines parties sans enlèvement de métal en actionnant un outil appelé *perçoir*, ou étampe, ou poinçon, au marteau ou à la presse et en lui donnant un mouvement rectiligne.

Le poinçon *(fig. 173)*, de forme conique ou autre, en acier, est à extrémité plane ou un peu arrondie, de manière à refouler le métal chauffé, tout autour du trou, à mesure de son enfoncement.

La pièce est placée, vers la fin de l'opération ou au début,

(1) Nous avons trouvé dans l'*Encyclopédie* l'indication du procédé suivant pour faire disparaître les traces des brasures : chauffer au rouge la pièce après finissage, et saupoudrer pendant la chauffe les parties brasées avec du soufre en poudre pétri avec de la terre de potier détrempée dans la bière. Il faut un connaisseur entendu pour retrouver la brasure.

(Nous avouons avoir appliqué le procédé, et n'avoir pas réussi.)

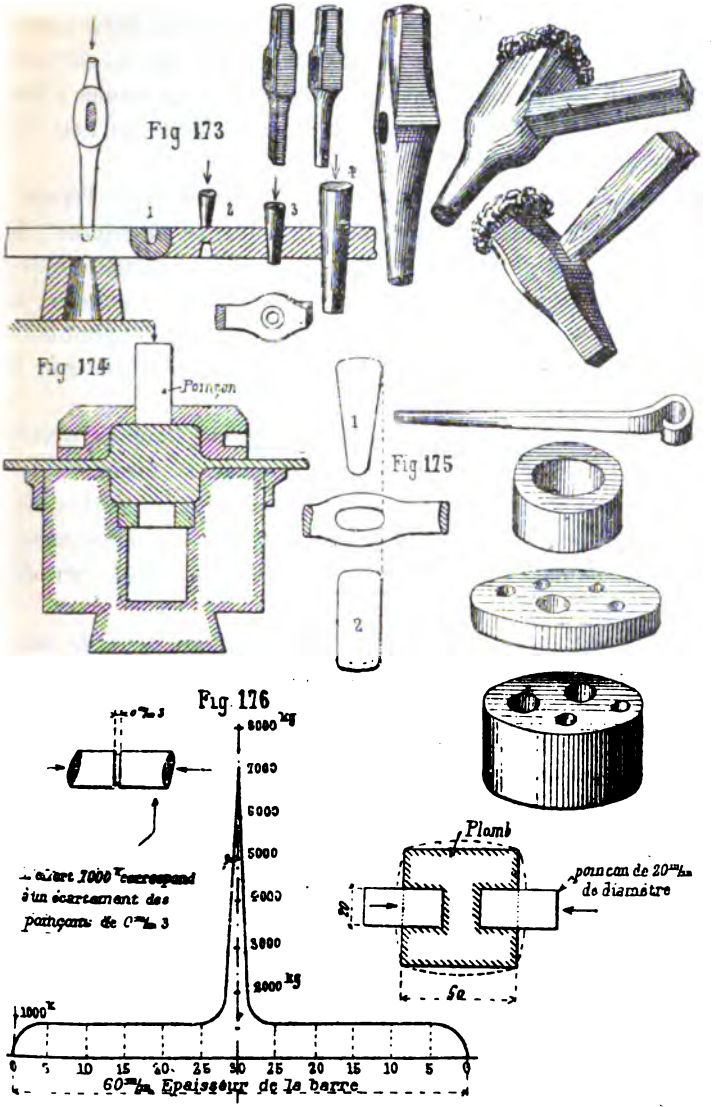
sur une sous-étampe ou bloc de perçage. Le poinçon, à extrémité de diamètre plus petit que le trou à produire, n'est engagé d'abord que sur la moitié de l'épaisseur ou plus, puis la pièce est retournée pour percer l'autre moitié.

Il se produit un refoulement latéral du métal qui augmente la largeur. Il se forme aussi une débouchure de faible épaisseur qui est expulsée par le passage du poinçon à travers, lequel agrandit le trou à la dimension voulue. Si le diamètre est grand, l'opération se fait avec plusieurs poinçons agissant progressivement, ou par un seul poinçon en opérant au pilon ou à la presse et en matrices *(fig. 174)*. Lorsque l'ouverture est carrée, ou rectangulaire à faces arrondies pour éviter les criques, on opère avec des poinçons de forme correspondante et on achève avec des mandrins chassés à force *(fig. 175)*.

Le refoulement du métal donne lieu à des renflements latéraux que l'on conserve si la forme les prévoit, ou que l'on fait disparaître. Dans bien des cas, pour les organes de machines, on préfère forger la pièce pleine et percer à l'ajustage.

Les essais de pénétration continue d'un poinçon cylindrique dans une matière malléable, telle que le plomb, montrent que l'effort croît au début de l'opération, pendant la période très courte de compression; puis, l'effort reste sensiblement constant si la pièce est épaisse; finalement il prend une valeur très grande, si la pièce est maintenue sur la face opposée à la pénétration.

Cet effort final diminue, au contraire, si la pièce est appliquée sur une sous-étampe percée. En opérant avec deux poinçons opposés, ceux-ci pénètrent simultanément de quantités sensiblement égales et la pression croît rapidement lorsque l'épaisseur de métal entre les poinçons n'est plus que de quelques millimètres, ainsi que le montre l'épure *(fig. 176)*. Il convient donc de ne pas chercher à réduire outre mesure l'épaisseur de la paroi entre deux poinçons quand on opère sur du fer ou de l'acier en matrices; pour percer, par exemple, un moyeu ou des écrous.



Essai de pénétration de deux poinçons dans un bloc de plomb cylindrique

L'effort de pénétration est très variable suivant que le métal se refoule latéralement ou longitudinalement, suivant qu'il est libre à la surface ou maintenu dans des matrices comme nous l'avons vu au refoulage et suivant que l'on donne ou non un mouvement de rotation à l'outil.

Le métal se refoule davantage latéralement lorsque l'épaisseur latérale est faible par rapport au diamètre du poinçon; le métal cède, la pièce se renfle; tandis que si la section transversale est très grande par rapport au diamètre du poinçon, le métal, en se refoulant peu latéralement, s'écoule longitudinalement en donnant lieu à un curieux évasement du trou à l'entrée (1).

Les lois de pénétration d'un poinçon d'acier dans les divers métaux varient avec leur nature et avec la forme et les dimensions relatives des pièces et du poinçon. On peut considérer le cas simple d'une matière malléable de grande masse relative donnant lieu à un effort peu variable dans la période principale.

Si p est la pression moyenne par millimètre carré de section du poinçon de diamètre d, l'effort de pénétration total serait $P = \frac{\pi d^2}{4} p$.

L'énergie dépensée pour une pénétration de hauteur h serait $T = \frac{\pi d^2 h}{4} p = Vp$ (V volume déplacé).

Le travail est proportionnel au volume déplacé et à la pression moyenne ou coefficient de résistance du métal. Ce coefficient pour le plomb = 3 à 5^{kg}. Pour le cuivre, l'effort moyen de pénétration à froid varie de 80 à 100^{kg} par millimètre carré. Pour le fer à divers degrés de température, les essais montrent que la résistance de pénétration varie comme suit :

(1) Nous ne pouvons, ici, ni relater par le détail ces essais, ni même donner les croquis si intéressants des éprouvettes déformées.

Fig. 177 Pénétration d'un poinçon en acier de 2,0 mm de diamètre, dans une éprouvette cylindrique de plomb, ou de cuivre, ou de fer

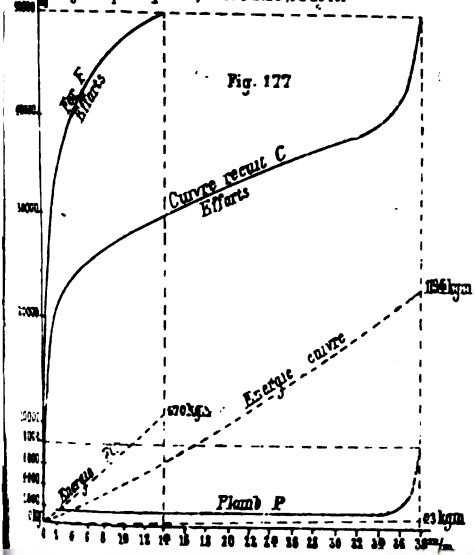
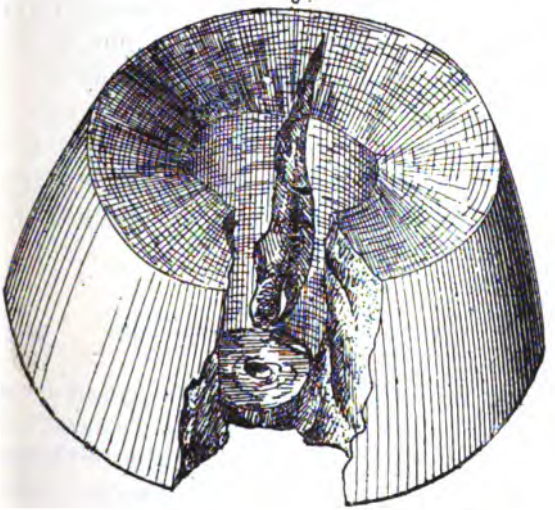


Fig. 178



Températures.	0°	400°	600°	800°	1000°	1200°	1400°
Résistance par millim. carré.	120 à 140	90 à 100	60 à 80	30 à 40	20 à 25	10 à 15	5 à 6^{k}

L'acier fondu, variété dite dure, exige :

240 à 300 — 200 à 260 — 140 à 170 — 90 à 110 — 60 à 70 — 30 à 40^{kg}

L'épure *(fig. 177)* montre les variations de l'effort de pénétration d'un poinçon en acier de 20^{mm} de diamètre dans des éprouvettes cylindriques de plomb, de cuivre, de fer dont le diamètre est de 60^{mm} et la hauteur 38^{mm}.

On voit que, pour le cuivre recuit provenant d'une barre laminée et étirée, l'effort de pénétration croît rapidement pendant la période de première compression correspondant à 2^{mm}; puis la progression de l'effort, moins grande que précédemment, persiste jusque vers la fin pour croître de nouveau très rapidement.

Pour le fer, la courbe F d'allure analogue à la précédente C est beaucoup plus relevée, donnant un effort moyen d'environ 150 à 160^{kg} par millimètre carré.

Dans ces essais, il faut un métal bien homogène, ductile, pour réussir à faire pénétrer le poinçon d'outre en outre. Le plus souvent, les éprouvettes s'ouvrent suivant une génératrice *(fig. 178)*. L'épure fait ressortir la grande influence de la malléabilité et de la faible résistance du plomb par rapport aux deux autres métaux et montre bien que le poinçonnage par pénétration et refoulement ne doit se faire qu'à haute température pour les métaux résistants.

Coupage, tranchage, cisaillage.

Le coupage des pièces forgées est ordinairement une opération auxiliaire servant à enlever un excès de métal, à fendre une barre pour l'ouvrir, à affranchir pour mettre à longueur. On emploie les outils *(fig. 179)* appelés tranches, couteaux,

Fig 179

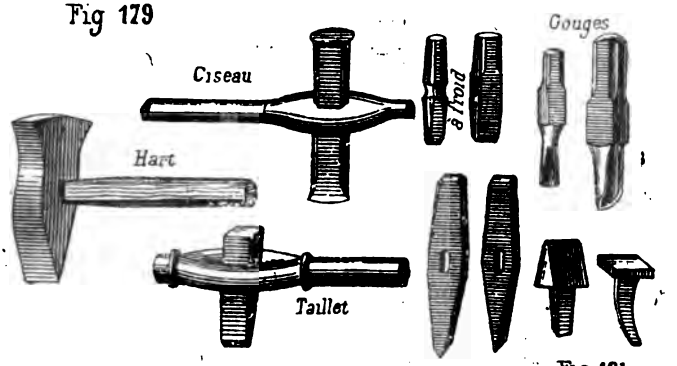


Fig 181

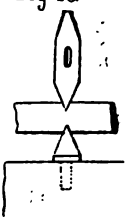


Fig 183

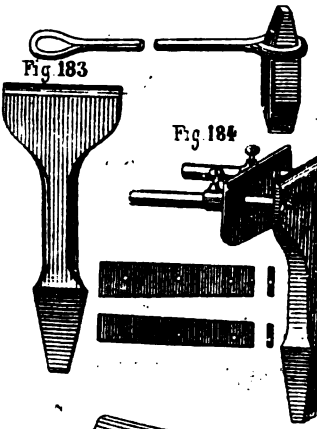
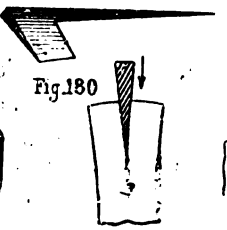


Fig 184

Fig 180



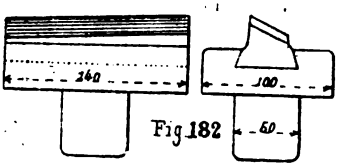


Fig 182

Fig 185

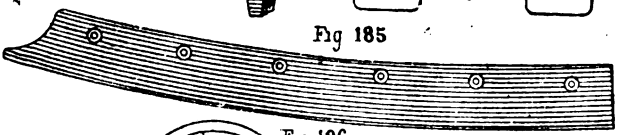
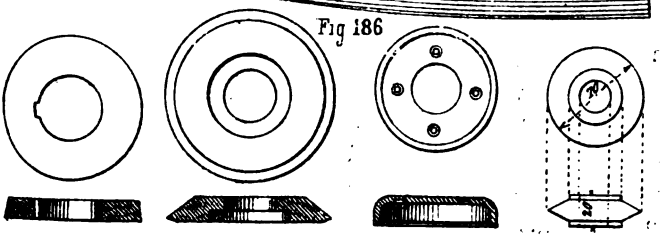


Fig 186



taillets, ciseaux, que l'on actionne à coups de marteau à devant ou de pilon. On opère à froid lorsqu'il suffit d'inciser le pourtour et de donner quelques coups pour briser la pièce au point voulu avec le marteau sur tas à casser.

Le découpage se fait le plus souvent à chaud, soit que l'on coupe en travers dans la masse, soit que l'on découpe à la surface. Pour découper des congés, on emploie la tranche-gouge à taillant courbe. L'angle des faces formant le tranchant de l'outil varie de 15 à 60° suivant la malléabilité du métal.

S'il s'agit de fendre une pièce sur la hauteur, on emploie le couteau, et afin d'empêcher la fente de s'étendre au delà de la limite fixée, il faut percer un trou *(fig. 180)* avant d'opérer la coupe qui se fait au jaune orange, le couteau d'acier étant à angle très aigu, environ 10°; l'opération se fait vivement, au pilon pour les grosses pièces. Le tranchage se fait aussi en plaçant la pièce sur une tranche dite *tranchet* fixée à l'enclume, et c'est sur la pièce que le forgeron frappe.

En employant en même temps le tranchet et la tranche *(fig. 181)*, l'effet produit est plus grand; la pièce est cisaillée entre les deux outils, la réaction agissant pour couper et non pour aplatir.

La *figure 182* est un tranchet rapporté sur le tas d'une machine à forger type Ryder.

Pour couper les minces épaisseurs, la tranche *(fig. 183)* présente une ligne tranchante plus étendue, l'outil est fixé sur un établi ou sur un billot; on frappe avec le maillet.

Parfois la tranche est munie d'un guide *(fig. 184)* permettant de découper sûrement une bande de largeur voulue.

Cisaillage. — Le tranchage ou découpage des pièces se fait très rapidement à la cisaille, surtout lorsqu'il s'agit de tôles à affranchir ou de bandes à refendre. On emploie des cisailles à leviers ou à guillotine avec lames droites ou courbes *(fig. 185)* animées d'un mouvement oscillant ou rectiligne, et des cisailles à lames circulaires *(fig. 186)* animées d'un mouvement de rotation.

Cisailles à leviers. — La cisaille à leviers actionnée à la main *(fig. 1, pl. XXIV)* était autrefois très employée pour le débitage des feuilles minces métalliques en ébauches de fils; elle est utilisée, de même que la cisaille sur établi *(fig. 2)*, pour découpage d'ébauches diverses dont le nombre est restreint.

Les cisailles mécaniques sont les seules adoptées pour le tranchage, le débitage des fortes épaisseurs ou des faibles lorsque l'opération se répète.

Les *figures 3, 4, 5* et *6* montrent la disposition d'une cisaille ordinaire à levier L actionné par une came E dont l'arbre est commandé par engrenages et poulies. Cette cisaille convient, par exemple, pour trancher les barres ou mises des paquets de fer corroyé, dont un guide J permet de régler la longueur. Pour minces épaisseurs, le modèle ancien *(fig. 7)* est encore adopté.

Dans le modèle Bouhey *(fig. 8)*, la lame fixe ou dormante est rapportée sur une pièce adaptée au bâti; la lame mobile est montée sur un coulisseau actionné par le levier L; le bâti est évidé pour le passage de la barre à travers, disposition nécessitée par la position des lames dont les tranchants sont placés parallèlement aux arbres de la commande.

Cisailles à guillotine. — Les cisailles dites à guillotine comportent ordinairement une lame dormante à tranchant horizontal, une lame mobile à tranchant oblique s'il s'agit de barres plates, à tranchant courbe symétrique s'il s'agit de grandes largeurs de tôles que l'on affranchit d'un seul coup.

Le coulisseau qui porte la lame mobile formant guillotine est convenablement guidé dans une glissière à rattrapage de jeu d'usure, qui assure une bonne tenue du coulisseau, et, par suite, une bonne coupe.

Ainsi que le montrent les *figures 1* et *2, planche XXV*, le coulisseau est actionné par mécanisme à bielle et excentrique solidaire d'un arbre en relation avec celui de la commande par des engrenages.

Un bloc de débrayage et d'embrayage permet à volonté d'interrompre l'action de l'outil ou de le faire agir.

Les *figures 1* et *2* se rapportent à une cisaille pour affranchir des larges plats ; les *figures 3* et *4* comportent une cisaille à lames de grande longueur dont le tranchant courbe donné à la lame mobile attaque la pièce des deux côtés en gagnant successivement le milieu.

Pour couper les fers ronds, la lame dormante *(fig. 5)* présente plusieurs trous de diamètres variables; la barre à débiter est engagée dans le trou correspondant et butte contre un guide réglant la longueur. Le type de cisaille *(fig. 5)* est adopté dans les boulonneries, les chaîneries, pour le débitage des barres en éléments qui se répètent à l'infini.

Lorsqu'il faut couper des barres profilées, les lames affectent des profils enveloppes qui attaquent, autant que possible, le métal à la fois en tous les points, de manière à opérer par cisaillement proprement dit, c'est-à-dire d'un seul coup à la façon de deux lames parallèles. Les *figures 6* à *14*, *planche XXV*, se rapportent à diverses dispositions de ces lames.

Les cisailles sont aussi actionnées par pression hydraulique avec outils multiples agencés comme *figure 1*, *planche XXVI*. Ce mode d'action motrice est particulièrement avantageux pour ces machines à travail intermittent exigeant de grands efforts pendant un temps court. Les organes mobiles massifs tels que le volant, les engrenages des cisailles ordinaires étant supprimés, il n'y a pas à craindre les coups de force vive produisant la rupture d'un organe, si on coupe une pièce trop froide ou trop grosse. La cisaille hydraulique ne permet pas de dépasser l'effort maximum déterminé. Pour les gros lingots d'acier à chaud, les blooms de 400 × 400, on emploie des cisailles disposées horizontalement ou verticalement.

Les *figures 2* et *3*, *planche XXVI*, montrent les modèles de Breuer et Schumacher à compresseur à vapeur combiné avec un compresseur à volume de liquide transmetteur

variable à volonté, qui permet de régler la course utile des organes suivant l'épaisseur de la pièce à cisailler. Un dispositif spécial évite les chocs au moment où la résistance s'annule brusquement, par suite du déchirement de la partie cisaillée.

Le modèle *(fig. 4)* permet de couper à froid des tôles d'acier jusqu'à 60^{mm} d'épaisseur et 2^{m} de largeur. On donne au couteau, soit la longueur nécessaire pour couper toute la tôle dans une descente, soit une longueur plus faible pour opérer en plusieurs coups. Un releveur à vapeur ramène l'outil mobile à sa position supérieure.

Cisailles circulaires.

Dans ces cisailles, les lames de forme cylindrique, ou légèrement conique, ou à double cône, ont une ligne de coupe circulaire. Les lames cylindriques ordinaires doivent être mises au rebut ou employées à une machine plus petite lorsqu'elles ont subi un certain nombre d'affûtages; aussi préfère-t-on adopter les lames embouties qui s'affûtent latéralement et conservent plus longtemps leur diamètre sans variation *(fig. 6, pl. XXVII)*.

Deux lames étant disposées de manière à se croiser un peu *(fig. 5)*, si on introduit une pièce d'épaisseur réduite, la rotation des deux outils en sens inverse détermine l'entraînement de la pièce et sa coupe suivant le plan tranchant des lames.

Les cisailles circulaires sont tout particulièrement adoptées pour le découpage des tôles en ébauches de formes diverses; le travail continu, régulier sur une longueur réduite, permet de bien diriger la pièce et d'obtenir des coupes droites ou courbes de courbure variable à volonté.

Ces cisailles sont aujourd'hui employées pour découper toutes épaisseurs en opérant par un seul passage si l'épaisseur est faible, en opérant en plusieurs passages si l'épaisseur est forte, au

moyen de lames à double cône disposées sur leurs arbres, de manière à pouvoir se rapprocher sans cependant se croiser.

Les *figures 1* et *2* montrent les cisailles circulaires ordinaires actionnées à la main ou mécaniquement, et pourvues de guides pour découper des bandes droites ou des disques de diamètre déterminé. Dans ce dernier cas, le pointeau, maintenant la tôle *(fig. 1)* doit être exactement en face de l'axe vertical des deux lames.

La disposition *(fig. 4)* est employée pour découper de longues bandes, des grands disques, des fils en cuivre ou laiton. Pendant le découpage en spirale d'une bande, le chariot C qui tient la tôle s'avance uniformément; la largeur de la bande est réglée par des galets disposés derrière les lames. Dans cette machine, les pièces rapportées F servant de guide, sont disposées de manière à consolider les deux branches du bâti, éviter toute flexion pouvant nuire au découpage.

La cisaille *(fig. 8* à *12)* (1) comprend des lames à double biseau conique agissant en plusieurs passes pour découper les fortes épaisseurs à froid ou à chaud, soit, par exemple, des tôles de chaudières, des plaques de blindage jusqu'à 60^{mm} d'épaisseur et plus.

La lame inférieure A *(fig. 8)* est solidement fixée sur un arbre B ne pouvant se déplacer verticalement. C'est la lame A′ montée sur l'arbre B′ qui règle la coupe par le déplacement vertical de B′, au moyen du mécanisme de monte-et-baisse comprenant la tige à palier E ajustée dans la vis F prenant écrou dans la douille rapportée G assemblée avec la tête D du bâti, de manière que cet écrou G ne puisse prendre aucun mouvement. En actionnant la vis F par les engrenages H et H′, ce dernier monté sur l'arbre intermédiaire I à volant manivelle, on produit le monte-et-baisse de la lame A′ pour régler l'écartement des lames.

(1) Modèle Cuisinier. Ce modèle a été modifié par la maison Le Blanc pour la coupe des fortes épaisseurs.

L'arbre R' est accouplé au tronçon B'_1 par un joint à rotule (type Cardan modifié).

La commande comporte deux couples de roues d'engrenages (KK') (MM') et les poulies PP' : les deux arbres B'B étant reliés par les roues T' et T. Pour faciliter la présentation de la pièce aux outils, un appareil de levage est disposé sur la tige E prolongée.

Cisailles multiples pour fendage.

Fendage. — Le découpage de petits échantillons de fer au moyen de lames circulaires multiples s'appelle aussi fendage et a donné lieu, depuis un siècle et plus, à la création de machines dites fenderies *(fig. 13* et *14)*, qui ont joué un rôle important dans la fabrication des verges métalliques mises en bottes.

Dans ce procédé, il n'y a pas, à proprement parler, enlèvement de matière, il y a simplement division de la pièce ébauche.

L'opération consiste à fendre longitudinalement une bande de faible épaisseur en plusieurs bandes étroites, en faisant passer la pièce primitive entre deux séries de lames coupantes en acier *(fig. 15)*, de forme cylindrique, qui se croisent deux à deux, de manière à produire une coupe analogue à celle de deux lames simples d'une cisaille circulaire.

Pendant le découpage, la pièce est entraînée par l'adhérence des disques qui tournent en sens contraire ; il suffit de la guider pour obtenir des verges de largeur égale à l'écartement ou à l'épaisseur des disques, sur toute la longueur de la bande. L'opération se fait ordinairement à chaud au rouge, les lames étant constamment arrosées d'eau.

Lorsqu'on refend des fers profilés, la pièce est convenablement guidée ; on n'utilise qu'une paire de lames *(fig. 6 bis)* à angle de coupe de 60° en biseau.

Le découpage est parfois appliqué à la fabrication des feuilles minces et des fils métalliques.

L'opération se fait alors d'une façon continue, la pièce étant animée d'un mouvement de rotation, et l'outil tranchant, d'un

mouvement proportionnel, rectangulaire ou parallèle à l'axe de rotation. Le découpage se fait donc suivant des spirales ou suivant des hélices. La feuille et le fil découpé sont ensuite passés au laminoir ou à la filière pour les régulariser et resserrer le métal qui doit être très malléable, sinon, le procédé donne des produits défectueux.

Les *figures 16* et *17* se rapportent à une machine à découper des feuilles de plomb dans un bloc M monté sur un mandrin tournant lentement. L'outil O est un large couteau découpant sur toute la longueur du bloc. Le chariot porte-outil C se déplace automatiquement en se rapprochant de l'axe de rotation. La feuille F s'enroule sur un tambour B (1).

Essai de coupe à la tranche.

Une barre de fer de section $\frac{30}{18}$ a été tranchée à froid à la presse en donnant lieu aux diagrammes des pressions et d'énergie *(fig. 5, pl. XXVIII)* qui caractérisent la première période de l'essai, soit celle de pénétration lente jusqu'à 8^{mm} sous un effort maximum de 29.800^{kg}; dans une deuxième période, la tranche sépare les parties brusquement en ne permettant pas d'estimer les efforts de déchirement ou de rupture par traction qui a lieu sur une épaisseur de 10^{mm}. A la rupture les parties se séparent, l'une en ne touchant plus la tranche, l'autre en étant raclée par l'outil *(fig. 1, 2, 3* et *4)*. La rupture brusque est produite par les efforts longitudinaux P″ *(fig. 6* et *7)*, projections des réactions normales aux faces de l'outil. Un peu avant la rupture, une crique apparaît vers le fond de l'entaille, puis la pièce se rompt dissymétriquement, attendu que l'on ne peut réaliser un équilibre mathématique.

L'effort maximum 29.800^{kg} donne une résistance maximum rapportée au millimètre carré de section tranchée égale à

(1) Nous signalerons, dans la deuxième partie, l'application aux fils métalliques.

$$R = \frac{29.800}{18 \times 30} = \frac{29.800}{540} = 55^{kg} \text{ par millimètre carré.}$$

La tranche était nouvellement affûtée. Avec une tranche un peu émoussée, l'effort avait atteint 36.800^{kg}, soit 98^{kg} par millimètre carré, c'est-à-dire plus du double du coefficient de résistance de cisaillage sur deux lames agissant simultanément. L'énergie de tranchage s'est élevée à 155^{kgm}, soit, par millimètre carré de section,

$$\frac{155}{540} = 0^{kgm},29.$$

L'angle de la tranche étant de 60°, les réactions normales P′ seraient égales à la pression P en ne tenant pas compte des frottements qui s'exercent pendant la pénétration de l'outil.

Les efforts longitudinaux P″ seraient égaux à

$$P'' = P' \cos \frac{60^\circ}{2} = P \cos 30^\circ = 29.800 \times 0,866 = 25.900^{kg}.$$

Or, l'éprouvette ayant encore 10^{mm} d'épaisseur, soit une section non tranchée de $10 \times 30 = 300^{mm2}$, la charge de traction par millimètre carré serait

$$\frac{25.900}{300} = 86^{kg},$$

ce qui paraît exagéré; cependant, cette valeur concorderait assez avec la résistance absolue de traction d'un fer ductile.

En opérant avec un marteau de 6^{kg} à bras, à devant et à coup oscillant énergique, l'entaille faite par la tranche présentait une profondeur de 2^{mm}, soit celle obtenue sous la charge de 13.000^{kg}; l'énergie utile étant ainsi de $15^{kgm},6$. Avec coup tournant, l'entaille avait 3^{mm} de profondeur, soit celle produite sous la charge de 18.000^{kg}; l'énergie utile est alors $31^{kgm},5$. Ce sont donc les valeurs à attribuer aux coups d'un marteau de ce poids sur une tranche à froid.

Les *figures 1* à *7* montrent les déformations de la barre.

L'aspect de la cassure dans la zone d'arrachement ne ressemble pas à celui d'une cassure par traction directe; elle se rapproche plutôt de la cassure par cisaillement.

Essais de cisaillement.

Nous distinguerons le cisaillement ou tranchage d'un seul coup au moyen de lames à tranchants parallèles, et le cisaillement par tranchage progressif au moyen de lames à tranchants obliques ou de lames circulaires.

Tranchage d'un seul coup. — Ce procédé s'applique aux barres de faible largeur relative et de forte épaisseur, ou à des pièces minces découpées en pleine tôle et dont on veut prévenir toute déformation. Les lames ont généralement un angle de coupe de 90° et déterminent un cisaillement direct, un glissement des parties qui se détachent sous l'action d'une pression croissante énergique. Des lames à angle de coupe assez inférieur à 90° s'ébrècheraient dans la coupe supposée faite à froid; des lames à tranchants obliques détermineraient une pression locale élevée qui détériorerait rapidement les outils, ou, dans le cas de sections profilées, produiraient des déformations prononcées ou des déchirements.

La pièce placée entre deux lames parallèles *(fig. 8, pl. XXVIII)* est soumise à une compression transversale qui croît jusqu'à la valeur correspondant à la résistance du métal au cisaillement; puis, brusquement, les deux parties A et B se séparent, fléchissent, s'arrachent l'une de l'autre en donnant lieu à des ruptures qui varient plus ou moins avec la nature du métal.

Sur les *figures 10* à *16*, qui se rapportent à des barres de fer, les différentes zones de déformations sont indiquées. La zone principale, soit celle de rupture brusque par glissement, est toujours nettement caractérisée et se distingue par un aspect dénotant des arrachements sous des angles variant quelque peu, ainsi que le montrent les lignes longitudinales des faces latérales, lignes qui s'infléchissent vers la ligne de rupture. Le cisaillage des cornières en fer *(fig. 17)* donne lieu à des phénomènes analogues.

Si l'on opère à chaud, en produisant une série de coupes

successives, on constate des déformations plus ou moir accentuées selon la température. On remarque bien le pe de ductilité du fer vers les températures donnant les cassure bleue et verdâtre; la rupture se fait avec un bruit caractéristiqu dénotant la fragilité. Comme l'indiquent les *figures 18* et *1*! les déformations vers 300° sont moins prononcées qu'à froid celles au rouge cerise le sont beaucoup plus. Le cisaillage d'u échantillon permet ainsi de se rendre aisément compte de l ductilité d'un métal aux diverses températures.

Le cuivre et le laiton accusent à froid des cassures (*fig. 2* et *21*) qui diffèrent un peu des précédentes (*fig. 19*).

En considérant les déplacements de la lame mobile et le efforts qu'elle transmet, on peut établir le diagramme ou courb (*fig. 9*) dont les abscisses sont les chemins parcourus et le ordonnées sont les efforts. On en déduit l'énergie dépensé directement par l'opération.

Les essais montrent que, suivant l'état des lames et des arête tranchantes, le coefficient de résistance maximum R ou du plu grand effort peut varier du simple au double et plus; que, pou du fer, les lames étant bien affûtées et rapprochées le plus possibl l'une de l'autre, c'est-à-dire dans de bonnes conditions de coupe le plan tranchant contenant les deux arêtes coupantes, le coeffi cient varie de 24 à 36^{kg} par millimètre carré de section tranchée l'acier ordinaire exige de 32 à 45^{kg}, le cuivre de 18 à 25^{kg}.

Le déplacement relatif des lames par rapport à la pièce qu correspond à la rupture principale varie avec la malléabilité e la ductilité du métal; une plus grande ductilité exige un plus grand déplacement.

Pour le fer, on trouve des valeurs comprises entre 0,2 e 0,4 de l'épaisseur e, de sorte que si le déplacement de la lame mobile est $L = me$, la largeur de la coupe l, et en admettan que l'effort moyen soit égal à $\frac{2}{3}$ de R; le travail de tran- chage serait :

$$T = \frac{2}{3} elRL = \frac{2}{3} me^2lR.$$

Soit par unité de largeur

$$T_1 = \frac{2}{3} me^2R,$$

et par unité de section $T'_1 = \frac{2}{3} meR.$

Pour $m = 0,3$, et $R = 30^{kg}$, il viendrait

$$T'_1 = \frac{2 \times 0,3 \times e \times 30}{3} = 6e.$$

Par exemple, soit à cisailler une barre de fer à froid de 100^{mm} de largeur sur 20^{mm} d'épaisseur donnant une section $S = 2.000^{mm2}$.

L'effort maximum peut atteindre $P = 100 \times 20 \times 30 = 60.000^{kg}$.

Le travail de cisaillement serait dans les conditions indiquées ci-dessus :

$$T = 2.000 \times 6e = 2.000 \times 6 \times 0,020 = 240^{kgm}.$$

Pour un lingot d'acier de 400×400 de section, tranché à chaud au rouge cerise, la résistance R peut être estimée à 12^{kg}; l'effort maximum serait

$$P = 400 \times 400 \times 12 = 1.920.000^{kg}.$$

m étant supposé égal à $0,6e$, l'énergie de tranchage serait :

$$T = \frac{2me^2lR}{3} = \frac{2 \times 0,6 \times 400 \times 400 \times 400 \times 13}{3} = 307.200.000^{kgmm},$$

soit 307.200^{kgm}.

Dans l'estimation de l'énergie, il n'est pas tenu compte des travaux des résistances des organes moteurs, de sorte que l'énergie totale dépensée est supérieure d'une quantité qui varie avec les mécanismes employés, et aussi, avec la vitesse que l'on donne aux outils.

Cisaillage progressif.

Le cisaillage progressif par lames obliques s'applique aux faibles épaisseurs relatives, et aux grandes largeurs telles que celles des tôles que l'on découpe en bandes.

L'opération comporte : l'emploi de lames à angle de coupe variant de 50° à 90° *(fig. 25, pl. XXVIII)*, suivant la dureté du métal ; une inclinaison des lames (5° à 15°) telle que la pièce ne soit pas repoussée par l'action des outils et ne détermine pas une flexion et un arrachement trop prononcés des parties qui se séparent *(fig. 26 à 29)*.

L'action des lames obliques est plus complexe que celle des lames parallèles. Les *figures 22* et *23* indiquent les phases de l'opération, qui comprend : une pression de pénétration des outils dans le métal, un glissement dans le plan de coupe en même temps qu'une flexion ; un déchirement dans le plan de coupe avec écartement latéral qui favorise la séparation. Celle-ci se fait peu à peu, d'une façon pour ainsi dire, continue dans les limites des longueurs découpées et sous un effort qui reste constant et légèrement inférieur à l'effort maximum qui se produit au début de l'arrachement, ainsi que le montre le diagramme *figure 24*.

Les expériences ont été faites avec des lames formant un angle de 10° *(fig. 29)*. Signalons que l'angle vers lequel la pièce commence à reculer est de 30° à 34° ; pour faire prendre les lames, l'angle étant plus grand, il faut s'opposer au recul par un effort poussant la pièce entre les outils. On conçoit que si l'angle α était voisin de 90°, cet effort de poussée serait excessivement grand.

Dans les essais, le plan moyen de la pièce était placé suivant le plan bissecteur du dièdre des lames, c'est-à-dire qu'on la laissait libre de prendre cette position. On notait l'effort vertical, c'est-à-dire la composante P *(fig. 29)* de la réaction P_1, sur les lames, toutes deux liées par la relation

$$P = P_1 \cos \alpha.$$

Pour $\alpha = 10^\circ$ $\cos \alpha = 0{,}985$, de sorte que P et P_1 sont peu différents.

La composante P_2 tend à pousser la pièce; elle doit être inférieure à l'adhérence des lames sur la pièce.

Nous signalerons seulement les éléments trouvés pour le cisaillage du fer.

Cisaillage par lames obliques.

Le rapport $\frac{P}{e}$ a des valeurs croissantes avec l'épaisseur. La loi des variations peut être représentée en prenant pour abscisses les épaisseurs e et pour ordonnées les efforts P rapportés au millimètre d'épaisseur, c'est-à-dire les valeurs $\frac{P}{e}$. On obtient une courbe *(fig. 30)* se rapprochant sensiblement d'une droite passant par l'origine A.

On peut donc tirer une relation simple $y = \frac{P}{e} = Ke$, K étant le coefficient angulaire de la droite AB en représentant par les mêmes longueurs, c'est-à-dire à la même échelle, les épaisseurs et les valeurs $\frac{P}{e}$.

On tire de la relation précédente

$$P = Ke^2.$$

Tableau n° 27.

ÉPAISSEUR e	EFFORTS MAXIMA P		RÉACTION P_1	$\frac{P}{e}$	$K = \frac{P}{e^2}$
	CISAILLE en état d'entretien ordinaire	CISAILLE affûtée	CISAILLE non affûtée	CISAILLE non affûtée	
1	2	3	4	5	6
mm 3,8	700	380	710	184	48
4,65	1.180	600	1.200	258	54
5,2	1.450	750	1.470	280	53,5
8,9	4.000	2.000	4.050	450	50
11,2	6.050	3.200	6.150	540	49
15	10.350	5.800	10.450	790	46
20	21.200	11.500	21.500	1.060	53

Dans les limites de ces essais, il s'ensuit que : *Les réactions exercées par une pièce cisaillée sur les lames d'une cisaille oblique sont proportionnelles aux carrés des épaisseurs.*

Quant à la valeur du coefficient K, il dépend essentiellement de l'état des cisailles et de leur inclinaison.

Pour les conditions pratiques, c'est-à-dire pour des lames légèrement émoussées, on peut utiliser les résultats de la sixième colonne du tableau n° 27.

On trouve que pour des lames faisant un angle de 10° et pour du fer, le coefficient K varie de 48 à 53, soit une valeur moyenne de 50.

La réaction P_1 peut être déduite de la relation

$$K = \frac{P}{e^2} = \frac{P_1 \cos 10^\circ}{e^2} = \frac{P_1 \cos \alpha}{e^2}, \quad \text{soit} \quad P_1 = \frac{K e^2}{\cos \alpha}.$$

Les essais que nous avons faits avec des lames dont l'angle α varie montrent que, suivant la nature du métal, il existe une valeur (13° pour le fer), pour laquelle l'effort P est minimum; mais la pratique, en vue d'obtenir une moindre déformation, adopte un angle variant de 5° à 10° pour les cisailles à guillotine.

Lorsqu'il s'agit de cisailles à leviers, l'angle des lames varie à chaque instant ; elles ont au début un contact moindre avec la tôle que quand la coupe se fait plus loin de l'articulation, de sorte que l'effort de pénétration augmente rapidement. C'est afin de réduire la valeur de cet effort, que la lame mobile des cisailles à grande oscillation présente une forme courbe à tranchant convexe en arc de spirale *(fig. 31)*, pour retarder la coupe et obtenir un effort à peu près constant au contact.

Avec les lames obliques à guillotine, la largeur à découper étant supposée assez grande, on peut, pour estimer le travail dépensé, négliger la période pendant laquelle l'effort P croît et la période finale pendant laquelle il décroît ; on peut admettre que le travail de cisaillage nécessite un effort P constant sur toute la partie tranchée.

Le chemin parcouru par l'effort P dans sa direction, pour couper une longueur l de tôle, est $l \sin \alpha$;

L'énergie est $T = Pl \sin \alpha = Ke^2 l \sin \alpha$;

Le travail par unité de surface cisaillée S est

$$T_1 = \frac{Pl \sin \alpha}{S} = \frac{Ke^2 l \sin \alpha}{el} = Ke \sin \alpha.$$

Pour l'angle de $10^\circ = \alpha$, $\sin 10^\circ = 0{,}174$.

Pour le fer à froid, K varie de 25 à 50 suivant l'état des lames, il viendrait pour $K = 50$

$$T_1 = 50 \times 0{,}174e = 8{,}7e.$$

Dans le cisaillage d'un seul coup, on a trouvé pour le fer également une valeur moyenne $T_1 = 6e$.

Il s'ensuivrait que le cisaillage à lames parallèles exigerait une dépense d'énergie peu différente de celle nécessaire avec des lames obliques. Le grand avantage de ces dernières serait de ne nécessiter que de plus faibles efforts. Ainsi, pour une épaisseur de 20^{mm}, on aurait $P = Ke^2 = 50 \times \overline{20}^2 = 20.000^{kg}$, alors que pour une largeur $l = 100^{mm}$, on avait trouvé 60.000^{kg} avec lames parallèles.

Dans le cas d'une tôle de 2^m de largeur ou de longueur et 20^{mm} d'épaisseur, il faudrait avec les lames parallèles un effort $P = 2.000 \times 20 \times 30 = 1.200.000^{kg}$.

Fig 187

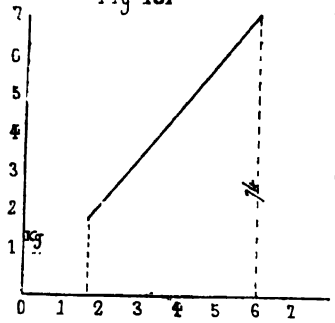
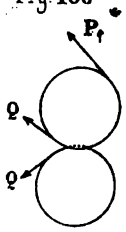


Fig 188



Ce chiffre est suffisamment éloquent.

Cas des lames circulaires.—Avec la cisaille à lames circulaires, nous avons déterminé l'effort moteur nécessaire au cisaillement en opérant sur une cisaille d'atelier dont les lames étaient en état d'entretien ordinaire.

La méthode d'expérimentation était la suivante : au moyen d'un dynamomètre, on mesurait l'effort exercé à la circonférence de la poulie motrice et on le comparait avec l'épaisseur des éprouvettes cisaillées.

La vitesse était toujours aussi lente que possible pour atténuer l'effet des forces vives dans les pièces en mouvement. En accélérant la coupe, l'effort augmentait sensiblement (par exemple de 11 à 18^{kg}, de 28 à 35^{kg}).

Nous avons opéré sur du cuivre.

En appelant P l'effort tangentiel à la poulie, on a trouvé les valeurs suivantes, déduction faite de la tare correspondante aux résistances passives à vide.

Cisaillage avec lames circulaires.

Tableau n° 28.

ÉPAISSEURS CISAILLÉES	EFFORT à la CIRCONFÉRENCE de la poulie = P	VALEURS de $\frac{P}{e}$	$K = \frac{P}{e^2}$	OBSERVATIONS
millim.	kilog.	kilog.		
1,7	3,4	2	1,18	L'effort tangentiel ayant pour bras de levier le rayon des lames est $P_1 = 8$ P.
2,8	9,5	3,4	1,21	
3	11,1	3,7	1,23	Le module de la machine = 8.
3,9	19,2	4,9	1,26	
4,8	28,3	5,9	1,23	Diamètre des lames = 160^{mm}.
6	44,4	7,4	1,22	

Ici encore nous remarquons que la loi des valeurs de $\frac{P}{e}$ est sensiblement une droite *(fig. 187)*, et nous pouvons de nouveau poser la loi approximative suivante : L'effort moteur dans une cisaille circulaire est proportionnel au carré de l'épaisseur cisaillée.

Si Q est l'effort résistant à la circonférence des lames, et si P est l'effort moteur supposé agir avec un bras de levier

égal au rayon de la lame *(fig. 188)*, on a, par suite de la commande des deux lames (1) :

$$P_1 = 2Q.$$

D'autre part, le module de la machine donne

$$P_1 = 8P,$$

et le tableau n° 28 donne

$$K = \frac{P}{e^2} = 1{,}2.$$

Si K_1 est un coefficient constant tel que l'on ait :

$$P_1 = 8P = 2K_1e^2$$

on tire $K_1 = \frac{P_1}{2e^2} = \frac{8P}{2e^2} = \frac{8 \times 1{,}2}{2} = 4{,}8$ pour le cuivre.

On peut admettre que le coefficient K_1' pour le fer est avec K_1 dans le même rapport que les coefficients de résistance au cisaillement direct du fer et du cuivre. Pour le cuivre en tôle, la résistance est moyennement de 20^{kg} par millimètre carré de section; pour le fer, la valeur peut atteindre 30^{kg}. soit donc

$$K_1' = K_1 \times \frac{30}{20} = \frac{4{,}8 \times 3}{2} = 7{,}2.$$

Diamètre minimum à donner aux lames pour une épaisseur e.

Dans les limites des essais qui précèdent, le diamètre des disques par rapport aux épaisseurs cisaillées n'a pas grande influence.

Cependant, le diamètre ne saurait être arbitraire si l'on s'impose que l'entraînement doive se produire naturellement.

Pour les métaux tels que le fer, le cuivre, *l'angle de prise* variant de 28° à 34°, il ne faut pas que l'angle 2α des tan-

(1) On pourrait ne commander que l'une des lames, l'autre tournant par entraînement ; mais on ne mettrait à profit qu'un seul frottement pour l'entraînement de la tôle, et les lames auraient plus de chances de glisser, tandis qu'en adoptant double commande par engrenages de même diamètre, on utilise le frottement sur chaque lame.

gentes *(fig. 189)*, correspondant aux points de contact, soit supérieur à ces valeurs.

Pour une épaisseur donnée e, un croisement ε des lames de rayon ρ, on peut poser :

$$OB = \rho \cos \alpha = \frac{2\rho - (\varepsilon + e)}{2},$$

soit

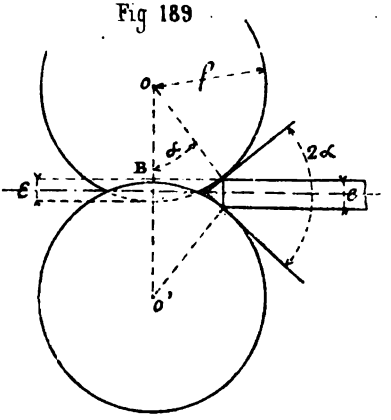
$$\rho = \frac{\varepsilon + e}{(2 - 2\cos\alpha)} = \frac{\varepsilon + e}{2(1 - \cos\alpha)},$$

pour $\varepsilon = 4^{mm}$, valeur suffisante pour assurer la bonne marche des lames, même après une certaine usure, pour $\alpha = 16°$, $\cos\alpha = 0{,}958$, il vient

$$2\rho = \frac{4 + e}{(1 - 0{,}958)} = 100 + 25e.$$

La bonne pratique adopte ordinairement pour le diamètre des lames $D = 30e$ (1).

Fig 189



Cette relation montre qu'il convient de ne pas exagérer le croisement ε.

Réactions sur les lames. — Pour calculer les réactions sur les lames de cisaille, nous pouvons utiliser la relation du travail.

Le travail moteur T_m effectué par seconde par une lame de cisaille est égal au produit $Q \times V$ (V étant la vitesse circonférentielle des disques variant ordinairement pour les métaux à froid de 10 à 15^{mm}).

Nous allons chercher une autre expression de ce travail en nous plaçant dans les conditions théoriques suivantes :

(1) Formule empirique qui correspond bien à celle que nous venons de déduire par la considération de l'angle de prise naturelle.

Nous supposerons que nous avons affaire à un métal non élastique au point de vue de la flexion; qu'à chaque instant, il y a contact intime entre la cisaille et la partie non cisaillée; que, de plus, la réaction reste constante.

Soit AB *(fig. 190)* la partie de la tôle en contact avec la cisaille considérée. On peut admettre que, pendant un déplacement infiniment petit, le système des deux disques fonctionne comme une cisaille à leviers simples dont les lames seraient tangentes aux deux disques et qui se rapprocheraient infiniment peu, de façon que leur angle pût être regardé comme constant. (Cette condition serait remplie si, dans cette cisaille à leviers,

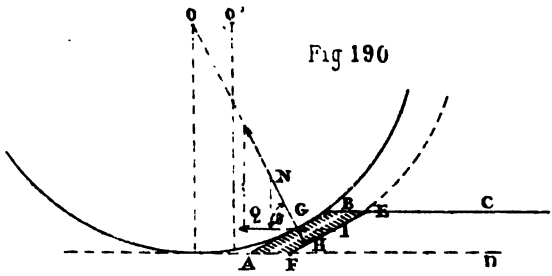


Fig 190

la tôle était constamment poussée contre les lames supposées fixes et d'angle constant.)

Dans ces conditions, soit N la résultante des réactions exercées sur les parties en contact.

Comme tout est symétrique, dans le cas considéré, par rapport au plan moyen horizontal de l'épaisseur de la tôle, nous pouvons admettre que chacune des lames fait la moitié du travail, ne considérer que la partie ABCD de la tôle et admettre que cette partie est cisaillée seulement par la lame supérieure.

Enfin, pour plus de facilité dans le raisonnement, nous supposerons qu'au lieu de déplacer la tôle, ce soit la cisaille qui roule sur cette tôle supposée immobile. Le centre O viendra

en O′ pour un faible déplacement qui détermine le cisaillement de la tranche ABEF dont le côté AB est supposé parallèle à FE. (On admet que la surface ABEF est infiniment petite et on néglige les effets de la flexion.)

Le travail élémentaire résistant serait donc

$$N \times GH.$$

Mais, on sait que le travail de la force N suivant GH est égal au travail de N suivant des trajectoires quelconques dont la résultante serait GH, et en particulier suivant GI et IH.

On a donc

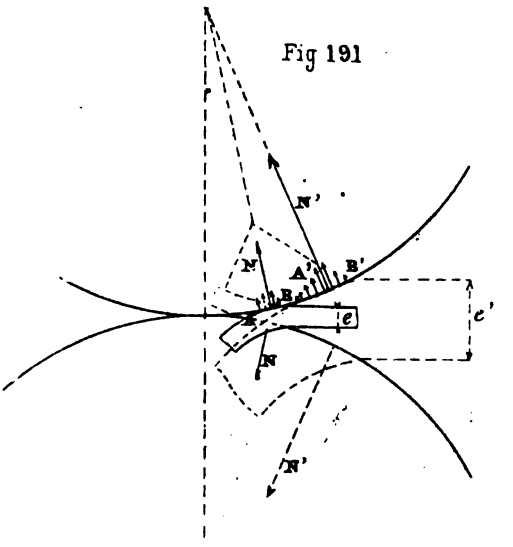
$$N \times \overline{GI} \cos(N.\overline{GI}) + N \times \overline{HI} \cos(N.\overline{IH}) = Q' \times GI + 0.$$

Et le travail total résistant pendant une seconde à la vitesse V′ serait

$$T_r = \int_0^{V'} Q' \times GI.$$

En appelant V la vitesse de la tôle, si nous supposons qu'il n'y ait pas de glissement entre la cisaille et la tôle, on a V′ = V (vitesse circonférentielle de la cisaille).

Fig 191



Q′ est constant = N × cos θ; on a donc

$$T_r = Q'V.$$

Or, en négligeant le travail des résistances passives, on a

$$T = T_r \quad \text{ou} \quad QV = Q'V,$$

soit

$$Q = Q'.$$

La composante horizontale de la réaction égale l'effort tangentiel, et, pour les deux lames, on a :

$$2Q = 2Q' = P_1 = 2K_1e^2$$

et

$$T = 2Q'V = 2K_1e^2V.$$

Pour une longueur cisaillée l, le travail serait

$$2K_1e^2l.$$

Par unité de surface cisaillée, on aurait :

$$T_1 = \frac{2K_1e^2l}{el} = 2K_1e$$

et pour $K_1 = 4{,}8$ (cuivre)

$$T_1 = 9{,}6\,e;$$

pour $K_1 = 7{,}2$ (fer) $T_1 = 14{,}4\,e$.

La résultante des réactions sur chaque lame a une inclinaison variable avec l'épaisseur *(fig. 191)*. On conçoit qu'elle est d'autant plus oblique à la verticale que l'épaisseur de la tôle est plus grande. Il est difficile d'établir la répartition des réactions au contact des lames.

Comme application des relations ci-dessus, considérons le cas d'une cisaille devant couper des épaisseurs maxima de 10^{mm} en tôles de fer.

L'effort moteur sur chaque lame serait

$$Q = K_1'e^2 = 7{,}2 \times 10 \times 10 = 720^{kg}.$$

Le diamètre des lames aurait : $30 \times 10 = 300^{m}$.

La résultante des réactions au contact de la pièce, en admettant qu'elle fasse un angle de 15° avec la ligne des centres, serait

$$N = \frac{720}{\cos 75^\circ} = \frac{720}{0{,}258} = 2.800^{kg}.$$

Le travail dépensé pour le cisaillement, à la vitesse de 12^{mm} à la seconde, s'élèverait à

$$T = 2 \times 720 \times 0{,}012 = 17^{kgm},3.$$

Sciage.

Le sciage est une opération présentant une importance relative dans certaines applications telles que le débitage, l'affranchissage des rails, des fers profilés, etc. (1). On emploie, le plus souvent, la scie circulaire ou disque denté en acier *(fig. 1, pl. XXIX)* monté sur un arbre horizontal animé d'un mouvement de rotation rapide (800 à 1500 tours); le diamètre varie de $0^m,80$ à $1^m,50$ (2).

L'opération se faisant à chaud, les dents sont relativement fortes. La pièce est présentée à la scie et poussée vers l'outil *(fig. 4)*; ou bien, la pièce est fixe, et c'est l'outil qui se déplace sous l'action d'un pousseur agissant mécaniquement par pression hydraulique ou autre *(fig. 5, 6, 7, 8* et *9)*.

Les dents peuvent présenter un angle de coupe de 80 à 90° *(fig. 3)*, disposition de beaucoup préférable à celle *(fig. 2)* que l'on rencontre souvent, et qui comporte un angle de coupe de 120°, déterminant l'arrachement du métal, exigeant un plus grand effort de pénétration, fatiguant davantage les dents qui se brisent et qui résistent moins bien qu'avec la forme *figure 3*.

Pour le sciage des lingots à chaud, la scierie est actionnée directement par moteur à vapeur et transmission intermédiaire comprenant deux courroies et poulies de commande. La scie est montée sur un balancier oscillant. (On scie des blooms d'acier jusqu'à $0^m,70$ d'épaisseur.)

Le sciage du fer, de l'acier et même de la fonte à chaud avec une simple scie à main de charpentier (3), était appliqué dès le

---

(1) Les applications de la scie circulaire, travaillant à chaud, se sont particulièrement répandues pour le tronçonnage des barres profilées, vers le milieu de ce siècle.

(2) Une maison de Sheffield a construit dernièrement pour une grande forge, une scie circulaire de 2^m de diamètre sur 10^{mm} d'épaisseur.

(3) *Annales de Chimie*, t. LXXXII, p. 218. Lettre adressée par M. Dufaud, directeur de l'usine de Montataire, près Creil, à M. d'Arcet (1725-1801).

commencement de ce siècle dans quelques forges. On signalait déjà que : « *si un disque de fer doux, animé d'un mouvement de rotation très rapide, coupe l'acier le plus dur, on ne doit attribuer la cause de cet intéressant phénomène qu'au ramollissement; attendu que la barre d'acier s'échauffe beaucoup plus que le disque de fer* (1). »

Les disques lisses sont couramment utilisés dans les grandes forges américaines pour le coupage à chaud des lingots, des barres, des rails, de préférence aux disques dentés. Ces derniers

---

(1) Extrait du *Manuel de la Métallurgie du fer*, par Karster, traduit de l'allemand par Culmann, seconde édition. Metz, 1830, t. Ier, p. 53.

L'*Engineer* (1880) signalait comme une nouveauté un appareil dont le fonctionnement paraissait tout à fait invraisemblable, dont la réalité constituerait un fait du plus haut intérêt au point de vue scientifique.

Cet appareil si curieux, inventé par M. Reese, métallurgiste de Pittsburgh, était le disque de fer doux coupant l'acier à froid *sans toucher la pièce*, par phénomène électrique et par le souffle puissant de l'air entraîné par le disque.

Rappelons que le disque employé par M. Reese a 1m,10 de diamètre, 0m,005 d'épaisseur et tourne à une vitesse circonférentielle de 80m. La pièce est montée sur un chariot mobile. Le métal de la saignée tombe en gouttelettes; le disque ne s'échauffe guère, la barre s'échauffe quelque peu.

Afin de nous rendre compte de la façon d'agir de l'outil, nous avons successivement opéré aux vitesses de 30, 50, 80, 100 et 120m. Nous avons constaté que, dans toutes les coupes, le disque et la pièce se touchaient, les vibrations sonores suffisaient pour l'indiquer, de même que les particules projetées de tous côtés à l'état d'incandescence.

Pour obtenir une coupe assez rapide, il faut opérer à une vitesse voisine de 100m. La pièce s'échauffe, le métal se ramollit, l'outil enlève mieux les particules excessivement ténues.

L'opération à chaud se fait dans de meilleures conditions. Plus la température est élevée, plus rapidement la coupe peut se faire et avec un moindre effort de poussée de la pièce contre le disque. Il suffit, par exemple, d'une demi-minute pour tronçonner une barre de fer de 50mm × 15mm portée au rouge cerise.

On peut, en une chaude, faire successivement cinq ou six coupes aisément. Nous avons recherché si l'électricité avait une action dans le phénomène. Nous avons constaté un courant insignifiant qui correspondait, suivant la vitesse, à des variations de quinze à vingt divisions d'un galvanomètre et à une énergie électrique beaucoup trop faible pour produire la fusion du métal.

Le frottement est le principal facteur de l'opération.

(Pour plus de détails, voir *l'Élève-Ingénieur* du 14 avril 1895.)

ont le désavantage de se criquer à la base des dents, ce qui détermine des ruptures ou nécessite un affûtage prononcé réduisant le diamètre. Les disques lisses s'usent moins rapidement, donnent des coupes plus nettes, mais exigent plus d'énergie à cause de leur grande vitesse, qui doit être voisine de 100^{m}, et de la division extrême des particules métalliques de la saignée.

Taillage.

La formation d'empreintes simples ou croisées au moyen d'un ciseau et d'un marteau, est une opération secondaire qui s'appelle : *taillage*.

Il n'y a pas enlèvement de matière; le métal est refoulé obliquement, relevé en partie pour former des saillies plus ou moins tranchantes, suivant le degré d'acuité des angles. C'est une opération qui se fait ordinairement à froid sur recuit de la pièce, qui est ensuite trempée ou non.

Le taillage s'applique, par exemple, à la taille des limes, des râpes (*fig. 11, 12, 13* et *14*), à celle des mors d'étaux. La taille des limes se faisait autrefois dans chaque atelier de serrurier, de forgeron, de taillandier. Aujourd'hui le taillage de ces outils se fait dans des ateliers spéciaux, dans des petites forges recevant l'acier en barres et les transformant en objets fabriqués.

Le taillage se fait avec un marteau relativement lourd (0^{kg}300 à 8^{gk}), à manche court, en col de cygne (*fig. 15*), ne nécessitant pas une grande vitesse, donnant ainsi une frappe peu vive assurant une meilleure taille et la conservation du ciseau, tout en fatiguant moins l'ouvrier.

(Nous signalons à la fabrication des limes le taillage mécanique.)

Moletage.

Le moletage est une variété de taillage mécanique sans enlèvement de matière au moyen d'un outil en acier appelé

molette *(fig. 16* et *17)*, animé d'un mouvement de rotation produit par l'entraînement de la pièce possédant ce même mouvement. Ce taillage est donc obtenu par roulement de l'outil et de la pièce, dont la taille s'opère peu à peu en faisant pression sur l'outil vers la pièce.

Ce procédé s'applique à la formation de stries sur des saillies ou collets de petites pièces de révolution, telles que têtes de vis, écrous spéciaux manœuvrés à la main, boutons de tenue des pièces, etc.

CHAPITRE IV

Laminage.

D'une façon générale, on entend par laminage l'opération qui consiste à étirer, allonger en bande, transformer les dimensions d'une masse métallique au moyen de rouleaux animés d'un mouvement de rotation continu ou alternatif et qui constituent les outils de la machine appelée laminoir (1).

Le procédé présente aujourd'hui de multiples applications permettant d'obtenir des pièces de formes diverses; les outils ont des dispositions, des mouvements relatifs qui conduisent à distinguer plusieurs variétés de laminage.

Nous diviserons les procédés de laminage en trois catégories :

1° Le laminage longitudinal ou parallèle;

2° Le laminage transversal ou circulaire dit aussi roulage;

3° Le laminage hélicoïdal.

Selon les particularités des outils ou de la pièce, ces catégories peuvent se subdiviser en variantes, ainsi que nous l'indiquerons.

I. — Laminage longitudinal.

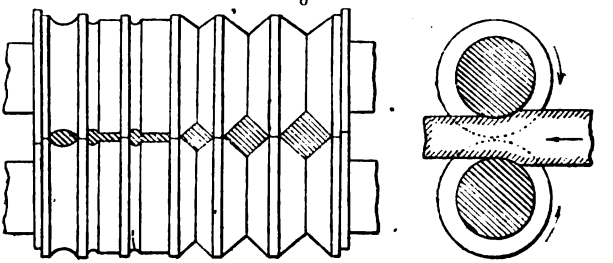
Le laminage ordinaire ou longitudinal consiste à engager une masse de métal, plus ou moins ébauchée, entre deux rouleaux de formes appropriées ou cylindres à axes parallèles ou obliques animés d'un mouvement de rotation en sens inverse.

La pièce *figure 192* est présentée perpendiculairement au plan

(1) En anglais *rolling-mill*, moulin.

des axes des deux outils qui la saisissent, la pressent, l'entraînent, modifient ses dimensions transversales, l'allongent et la rejettent plus ou moins transformée et régularisée. Dans cette opération, la pièce possède un mouvement rectiligne, ou se courbe plus ou moins selon que la section est plus ou moins symétrique et suivant que les cylindres ont des diamètres égaux ou différents. Le laminage se fait par plusieurs passages successifs de la pièce; il faut l'amener progressivement, de la forme primitive, généralement prismatique, à la forme finale, qui peut être des plus variées; dans chacun des passages entre

Fig. 192



les cylindres, il faut obtenir tout l'étirage ou déformation de section compatible avec l'état du métal.

La vitesse circonférentielle variant de 1^m à 4^m et plus par seconde, le travail est rapide.

Ce procédé est de grand rendement; il a contribué dans une forte mesure à développer l'emploi du fer et de l'acier; il est appliqué à la plupart des objets qui se prêtent au façonnage entre rouleaux, mais il ne donne pas au métal une homogénéité aussi grande que celle obtenue par le martelage.

Les métaux se laminent à froid exceptionnellement, à chaud et à haute température le plus souvent. Il importe, quand on opère à chaud, d'accélérer le laminage et d'éviter toute perte de temps. On a cherché aussi à laminer directement le métal à

l'état liquide ou semi-fluide. Dès 1846, ce dernier procédé était très étudié (1). L'appareil comportait un récipient contenant du métal (plomb) maintenu liquide par un foyer spécial; un mécanisme simple immergeait un plongeur faisant déborder régulièrement le métal qui s'écoulait entre deux cylindres où il se figeait et où il se laminait en feuilles dont l'épaisseur variait à volonté.

Un courant d'air intérieur refroidissait les cylindres.

En 1857, époque de sa grande invention, H. Bessemer appliqua ce procédé au laminage de fines tôles et de petites barres d'acier.

Ce procédé ne fut pas appliqué industriellement: à cette époque, il était prématuré.

Il a été repris, depuis quelques années, par quelques Américains et par Bessemer également, qui est arrivé à vaincre les difficultés du travail avec apparence de succès.

Ce procédé permettrait de réduire beaucoup de manipulations préparatoires, de supprimer des frais onéreux, ce serait un grand progrès. Il vise aussi à s'appliquer aux grosses pièces en acier ou fer fondu dont on ne poursuit le laminage que jusqu'au cerise clair, si l'on veut éviter les traces de cristallisation nuisibles à la résistance et si l'on veut opérer avec une bonne répartition de la chaleur, en ce sens que la partie centrale, conservant une plus haute température que les parties extérieures supposées très refroidies, le laminage se fait alors dans de mauvaises conditions.

Si la pièce est en acier dur, il peut se développer, après complet refroidissement, des tensions moléculaires qui le rendent cassant ou des tapures qui affectent la solidité.

Lorsqu'on lamine à basse température ou à froid, le métal est fortement resserré, écroui à la surface. Il augmente de densité, ainsi que l'indique l'accroissement de longueur ne compensant pas la décroissance de la section, le volume diminue. La

(1) H. Bessemer prenait un brevet pour la production des feuilles d'étain et de plomb directement du métal liquide.

résistance est augmentée, mais la ductilité est réduite à peu près en proportion de l'augmentation de la résistance.

Le laminage à froid des pièces de fer et d'acier doux a été essayé en Europe à Sclessin, puis abandonné. Il est pratiqué aux États-Unis depuis 1851 (1) et tend à se développer pour l'achèvement des pièces.

Il a fonctionné dès 1859 à Birmingham-Pittsburgh où actuellement on produit plus de 50.000 tonnes de fer fini, dont 6.000 tonnes de barres, de tiges, plaques ou tôles laminées par l'emploi d'engins très puissants. On y fabrique aussi des pièces frottantes, des coupoirs ou dents de moissonneuses ou de faucheuses dont la dureté acquise par les fortes pressions équivaut à une trempe dure.

Disposition des cylindres. — Les cylindres présentent des formes variables. Ceux à surface lisse permettent d'obtenir des bandes minces, des tôles ordinaires, des plaques de cuirassement, d'épaisseur uniforme ou variable suivant que les génératrices des outils sont parallèles ou obliques.

Des cylindres cannelés donnent des tôles ondulées, des barres, des fils dont les sections correspondent à celles des cannelures *(fig. 192)*. Des cylindres à empreintes peuvent produire des pièces de forme telles que : ébauches de marteaux, de crampons.

Lorsqu'il faut modifier d'une manière notable la section d'une pièce laminée, il convient d'opérer graduellement et par des sections intermédiaires plus ou moins nombreuses, suivant la ductilité du métal et de façon à toujours bien remplir la cannelure s'il s'agit, par exemple, d'une barre profilée.

Le mode d'action des cylindres sur la pièce restant toujours le même dans la période de régime, les déformations ont un caractère de grande régularité et de continuité.

L'étirage étant généralement prononcé, les pressions succes-

(1) Brevet de Bernard Lauth, 1851.

sives exercées par les outils resserrent convenablement les molécules, rendent plus homogènes les divers éléments qui s'amincissent et se disposent en lignes parallèles ou couches d'une extrême finesse lorsque l'étirage est poussé très loin.

Cette disposition des éléments métalliques en fibres parallèles est la caractéristique du laminage longitudinal.

Elle se manifeste particulièrement dans les fers soudés lorsqu'on opère sur des barres de faible épaisseur au rouge sombre.

Le laminoir constituant une presse rotative à action continue ou intermittente permet, mieux que le marteau, l'étirage des métaux peu ductiles.

Mais, pour une même qualité de métal capable de supporter l'action de l'un ou de l'autre des deux outils, on constate que le métal martelé au pilon est toujours plus résistant et présente plus de ductilité que celui laminé.

Ainsi, on a trouvé pour une barre d'acier étirée au laminoir une résistance de rupture de 40^{kg} par millimètre carré et un allongement de 13,5 0/0, tandis que la même pièce façonnée au pilon dont l'action s'exerce plus énergiquement sur toutes les parties de la barre, donnait une résistance de 52^{kg} avec un allongement de 17 0/0.

Il est aussi reconnu que le laminoir convient moins que le marteau pour souder les paquets de fer.

De même que pour le martelage, la cannelure en V est favorable à l'étirage au laminoir. Cependant, l'angle, qui devrait être aigu comme en A *(fig. 193)*, est obtus, comme en B, de manière à ne pas donner lieu à de trop grandes variations de vitesses au contact des côtés, à de trop grands glissements, et, aussi, pour ne pas trop affaiblir les cylindres dans la section du sommet de l'angle. Souvent on adopte, de préférence, la forme C en ogive, et, pour le dégrossissage de grosses pièces. celle D dérivée du carré à sommets abattus ou arrondis. Dans cette dernière forme, la variation des vitesses donne lieu à des glissements vers les angles horizontaux, vers les plus grands dia-

mètres; là où la pression est moins grande, par suite du vide qui se produit quelque peu. Le métal étant moins libre au sommet, la pression est plus forte, l'entraînement se fait par les parties avoisinantes. Cette action est souvent accusée par la surface plus lisse vers la diagonale horizontale.

L'allongement se produit donc davantage sur les angles du V qu'au milieu, ce qui s'observe sur les pièces dégrossies qui présentent une cuvette aux abouts *(fig. 193bis)*, bien que la pièce soit retournée à chaque passage. C'est l'inverse qui se

Fig. 193

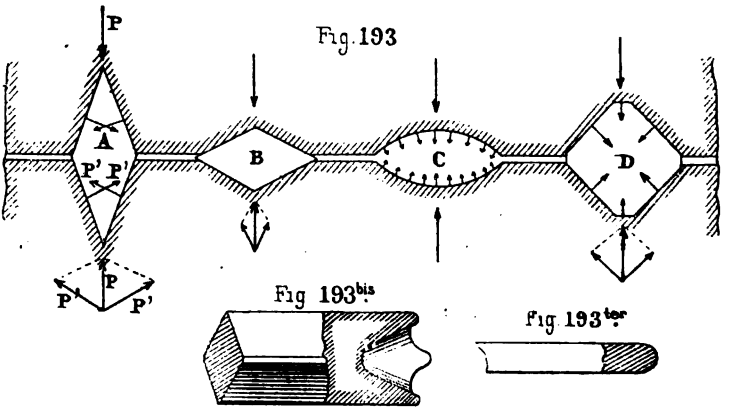


Fig 193bis

Fig 193ter

produit avec des tôles, les abouts sont toujours arrondis *(fig. 193ter)*, le métal se déplaçant plus au milieu qu'à la surface, l'action de la pression ayant plus d'effet que celle de l'entraînement par adhérence.

Divers types de laminoirs.

Le laminoir a été employé en premier lieu pour la régularisation de l'épaisseur des bandes de métal servant à la fabrication des monnaies, des médailles; il était déjà adopté pour la confection des tables et feuilles de plomb. Les laminoirs appli-

qués à ces métaux ont servi de premiers modèles à ceux pour le fer. A ce titre, nous indiquons *(fig. 2, pl. XXX)*, « un *moulin à laminer* les lames de métal pour monnaies employé au XVIIe siècle. La *figure 1* représente le laminoir du dégrossi. A est le conduit par lequel passent les lames, DD les cylindres ou rouleaux, FF les vis de réglage. La *figure 2* est le laminoir d'après le dégrossi; A est le conduit, BB les rouleaux, FF les vis, CC les pignons qui font tourner les rouleaux *(fig. 6)* (1) ».

Dans le moulin dégrossisseur, la bande de métal était engagée verticalement, tandis que dans le finisseur, la bande était présentée horizontalement.

Trois laminoirs de ce genre étaient mus par un manège à quatre chevaux; les transmissions intermédiaires, peu nombreuses, comprenaient des roues à lanternes et des hérissons.

Laminoir à plomb. — Les *figures 3* et *4* se rapportent à un laminoir à plomb actionné mécaniquement, en usage en Angleterre au XVIIe siècle.

« Le laminoir à plomb est composé de deux cylindres ou rouleaux A, B de fer fondu de 5 piés de long, non compris les tourillons. Ces cylindres ont un pié de diamètre et pèsent chacun deux mil huit cents livres (1).

» Leur situation est horizontale et ils sont placés en travers et vers le milieu de l'établi du laminoir, comme on voit *figure 3.* »

Suit la description complète des organes et du *verrouil* E de changement de marche pour embrayer ou débrayer l'une ou l'autre des deux lanternes D ou F mobile sur l'axe CG, auquel elle devient alors fixe.

« Par ce moyen ingénieux, applicable à bien d'autres machines que le laminoir, on est dispensé de retourner les chevaux du manège pour faire tourner les cylindres en sens contraire, et de la peine qu'il faudrait prendre de transporter la table de

(1) Extrait de l'*Encyclopédie*, t. IX, p. 229.

plomb, du poids de 2.600 livres ou environ, du côté du laminoir où elle est sortie d'entre les rouleaux au côté où elle y est entrée; car on ne lamine que d'un seul sens, ainsi qu'on l'expliquera après avoir parlé du régulateur.

» Le régulateur est l'assemblage des pièces au moyen desquelles on approche ou on éloigne les cylindres l'un de l'autre en élevant ou abaissant le cylindre supérieur.

» Après avoir décrit cette belle machine, il ne reste plus qu'à ajouter un mot sur la manière de s'en servir, en quoi l'opération du laminer consiste.

» La table de plomb ayant été fondue, ébarbée et nettoyée, est enlevée par la grue tournante PRS, pour être portée sur les rouleaux de bois qui composent l'établi du laminoir.

» Il faut remarquer que la table n'est pas laminée dans les retours, mais seulement dans les passages, lorsque le cylindre est mû par la lanterne F. Moyennant ces divers secours, c'est assez de six hommes pour servir la machine, et de six chevaux pour la faire marcher toute l'année onze heures par jour; et on peut, en dix heures de travail, réduire une table de plomb de dix-huit lignes à une ligne d'épaisseur : pour cela, il faut qu'elle passe environ deux cents fois entre les cylindres. »

Dès les premières années de l'application du moulin ou laminoir au travail du fer, on fabriqua des bandes moulurées pour les pièces de serrurerie.

La *figure 5* représente « en perspective et du côté d'aval, l'équipage des laminoirs établis à Essonnes pour profiler les plates-bandes de balcons à deux doucines, etc... AB la barre à profiler; la partie A du côté d'amont n'a point encore passé par le laminoir. La partie B du côté d'aval, qui en est sortie, est entièrement profilée (1). »

« C'est, suivant le rapport de MM. les Commissaires de l'Académie des Sciences, du 23 décembre 1752, un laminoir composé

(1) Extrait de *l'Encyclopédie*, t. IV : *Des Planches.*

de deux cylindres de fer, dont l'un, C, est profilé sur sa circonférence, pour imprimer, sur les plates-bandes AB les moulures qu'on veut leur donner. Les deux cylindres de ce moulin sont menés par deux roues à l'eau ; le cylindre inférieur D est mené immédiatement par le tourillon dont le bout quarré E reçoit la boîte de l'arbre ; l'autre roue mène le cylindre de dessus C en sens contraire au moyen de renvois de roues dentées et lanternes...

» Ces deux cylindres étant en mouvement, on présente la bande de fer rouge au profil qu'on veut y imprimer. Saisie entre les deux cylindres, et entraînée par leur mouvement, elle s'allonge et se profile d'une seule opération sur toute sa longueur, en très peu de tems. »

« Pour empêcher que la bande de fer qu'on profile ne s'enveloppe autour du cylindre profilé, un ouvrier la saisit avec la pince aussitôt qu'elle commence à passer de l'autre côté du cylindre, jusqu'à ce qu'elle soit entièrement sortie. »

De nos jours, on fait usage de laminoirs analogues actionnés à la main ou par transmissions motrices mécaniques.

La *figure 1*, *planche XXXI*, est un laminoir à main pour petites bandes comprenant deux petits rouleaux, à axes parallèles, dont l'un est monté sur l'arbre de commande. L'autre rouleau est monté sur un axe dont les coussinets se déplacent à volonté verticalement dans les flasques formant bâti. Ce mouvement vertical produit par les vis qui actionnent les coussinets détermine la pression nécessaire pour réduire l'épaisseur après chaque passage.

La *figure 2* représente un laminoir plus complet actionné mécaniquement, le plus souvent employé pour la régularisation de bandes étroites laminées à froid, et aussi pour réduire les épaisseurs de bandes métalliques à chaud qu'emploient diverses industries pour la fabrication des pièces comportant des préparations particulières faites dans les ateliers de mise en œuvre définitive.

Dans les grandes forges, pour le travail du fer, de l'acier,

du cuivre, etc., les laminoirs sont des engins de fortes dimensions, qui comprennent le plus souvent plusieurs paires de cylindres disposés dans des cages placées côte à côte ou parallèlement, et qui constituent des ensembles appelés *trains*, dont on distingue parfois le *train ébaucheur*, le *train dégrossisseur*, le *train finisseur*, lorsque la pièce comporte des passages multiples entre des cylindres différents. La *figure 3* rappelle un type d'anciens trains commandés par roue hydraulique et engrenages intermédiaires.

Les *figures 4*, *5* et *6* montrent des trains actuels ordinaires pour des pièces de faible section, que l'on actionne par transmissions intermédiaires; mais les gros laminoirs, tels que ceux *(fig. 7* et *8)* pour lingots, fers profilés, grosses tôles sont mus directement par des moteurs à vapeur à deux ou à trois cylindres souvent disposés de manière à pouvoir renverser la marche rapidement, alors qu'ils tournent à des vitesses de 100 à 150 tours par minute. Ces machines développent des puissances jusqu'à 10.000^{chvx} pour les laminoirs de grande production, tels que ceux pour rails d'acier à débit très élevé.

Laminage sur plats et sur champs. — Le laminage en cannelures exige de nombreux passages pour réduire la section transversale à des dimensions voulues. Les cylindres doivent présenter de nombreuses cannelures décroissantes.

On a été amené, afin de simplifier l'outillage, à laminer les pièces simultanément sur plats et sur champs, au moyen de deux cylindres horizontaux et de deux cylindres verticaux lisses ou cannelés *(fig. 9)* (1).

Dans le cas de pièces rectangulaires, on voit que l'emploi de cylindres lisses a le grand avantage d'éviter les frottements considérables des collets sur les faces de champ.

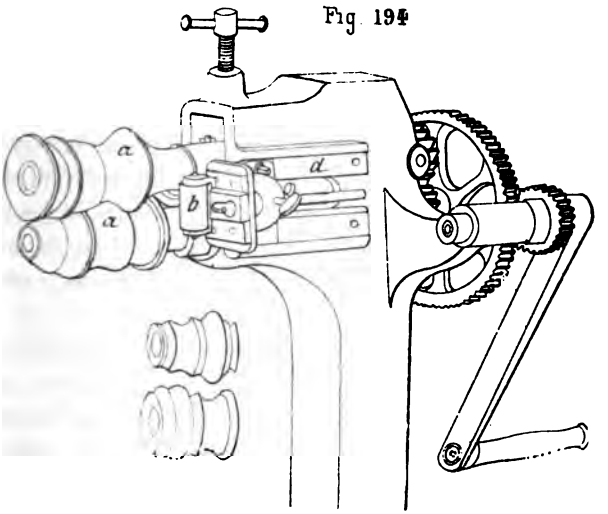
Les quatre cylindres sont disposés deux à deux de manière

(1) Laminoir par Wittkowitz.

à pouvoir se déplacer transversalement au sens du laminage, afin de régler à volonté dans certaines limites les dimensions de passage de la pièce qui est présentée toujours du même côté, ou qui est animée d'un mouvement alternatif dit reversible. Ce procédé de laminage a donné lieu à diverses dispositions, telle que celle *(fig. 8)* permettant d'obtenir toutes formes profilées, et les laminoirs sont appelés universels (1).

Laminage profileur. — Quelquefois le laminage ne modifie

Fig. 194



que la forme de la section transversale sans diminuer la surface ; il profile transversalement sans étirage. Ce procédé est appliqué à la transformation de feuilles minces, de bandes, de zinc, de fer, de cuivre, qui doivent présenter soit des ondes régulières, soit des sections moulurées diverses.

Les cylindres, tels que ceux de la *figure 194*, sont de profil correspondant à celui à obtenir et sont rechangeables sur les arbres de la machine ou laminoir à profiler.

(1) C'est Daelen, directeur des forges de Hoerde, en Westphalie, qui a inventé le laminoir universel en 1848.

Ce laminoir est actionné par manivelle à main; il s'applique à de minces épaisseurs et de faibles largeurs; mais, nous trouverons, dans la deuxième partie, ce procédé de laminage adopté pour des pièces importantes, telles que les tôles ondulées, les viroles nervurées, etc., qui nécessitent des laminoirs de fortes dimensions.

Laminage à empreintes. — Lorsque le profil longitudinal de la pièce est variable, les cylindres présentent des empreintes correspondantes, établies en tenant compte du retrait si le laminage se fait à haute température. Les cylindres peuvent, suivant leur développement, avoir une ou plusieurs empreintes identiques : ce sont, pour ainsi dire, des matrices rotatives. On conçoit que les cylindres doivent être parfaitement repérés ; ils sont tous deux commandés. Le laminage se fait soit en un seul passage, soit en plusieurs passages dans des empreintes multiples progressives. Si la pièce se répète dans la même barre, les empreintes sont en nombres aliquotes du pourtour des cylindres.

Afin de faciliter la construction des outils, ils sont formés de plusieurs parties assemblées par boulons ou par frettes, ainsi que le montre la *figure 195* qui se rapporte à des laminoirs (1) pour petites pièces telles que billes *(fig. 197* et *198)*, des ébauches de clous, des éléments profilés et coupés *(fig. 199* et *200)*.

Pour enlever les bavures, les cannelures présentent des bords tranchants de chaque côté d'une même rainure; les bavures se trouvent coupées comme *figure 196*.

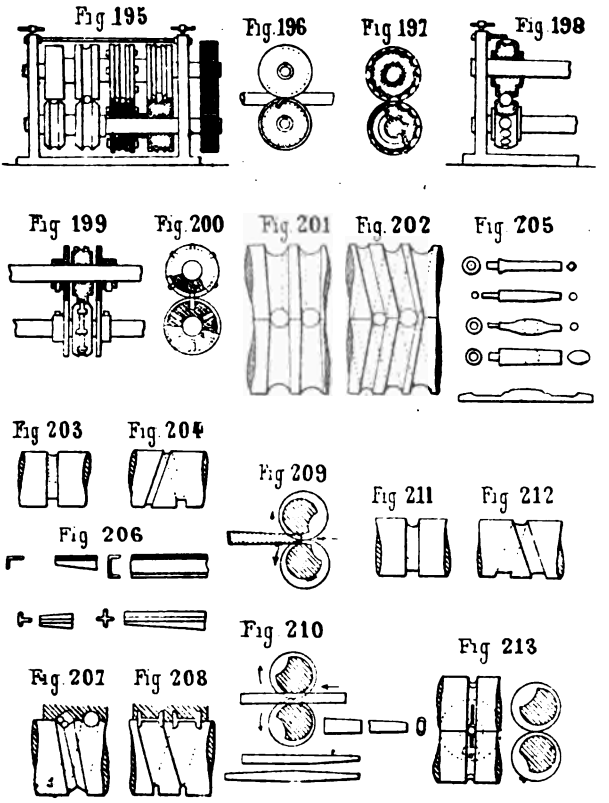
Le laminage à empreintes est appliqué à toutes sortes de pièces qui se répètent; aux ébauches de marteaux, aux essieux, rais de roues, broches de filature, objets de taillanderie, coutellerie, de ferronnerie, de clouterie, au taillage des limes, etc.

On s'ingénie à trouver des formes de cannelures se rapprochant le plus possible de la pièce finie, ce qui réduit le prix

(1) Laminoirs par Hastings. Brevet du 27 août 1889.

de revient dans une grande mesure pour les objets qui se fabriquent à l'infini.

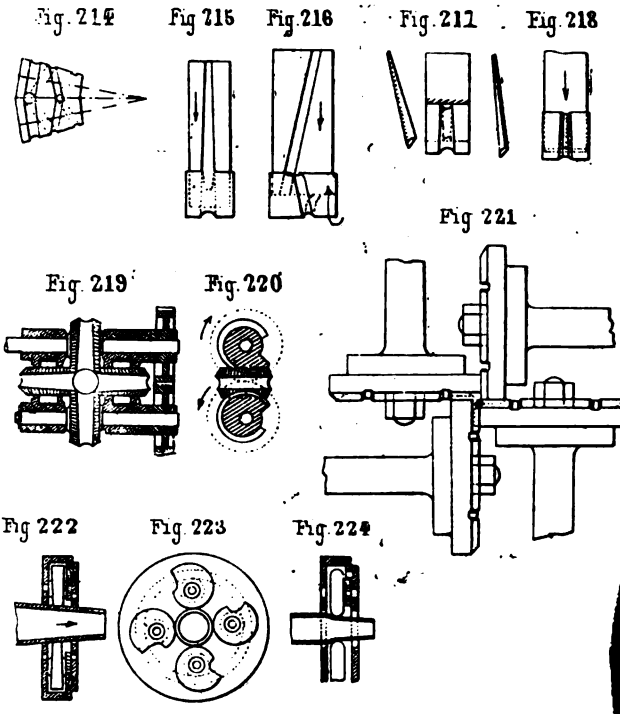
Lorsqu'il s'agit de façonner des barres coniques ou des tuyaux de cette forme, on emploie deux cylindres *(fig. 201*



et *202)* (1), à rainures coniques hélicoïdales ou à rainure conique circulaire si la longueur n'est pas grande. Les pièces subissent un certain étirage en passant dans les cylindres.

(1) Brevet Lorenz du 12 décembre 1888.

Lorsqu'on lamine coniquement des barres ou tuyaux en commençant par leur milieu ou par tout autre point de leur longueur et en allant vers l'une ou vers les deux extrémités, en faisant passer une partie ou les deux parties de la barre à travers les cylindres, on peut produire des essieux pleins ou



creux, des poutres à section à T, à double T, etc., avec des sections ayant approximativement une résistance égale contre la rupture à la flexion, ainsi que le montrent les *figures 20[illegible] à 213.*

On peut également, avec ces cylindres, fabriquer des tuyaux coniques courbés à froid ou à chaud, ou roulés, en faisant passer des fers plats laminés ou découpés coniquement.

Fig. 225

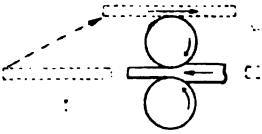


Fig. 226

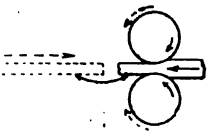


Fig. 227

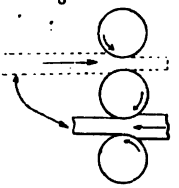


Fig. 228

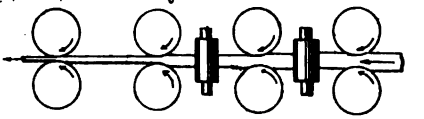


Fig 229

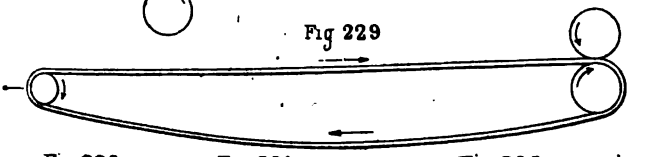


Fig. 230

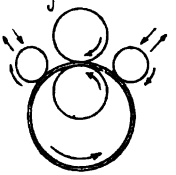


Fig. 231

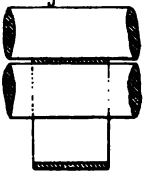


Fig. 232

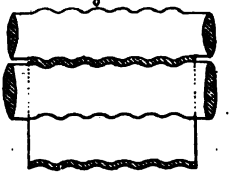


Fig. 233

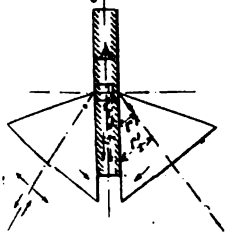
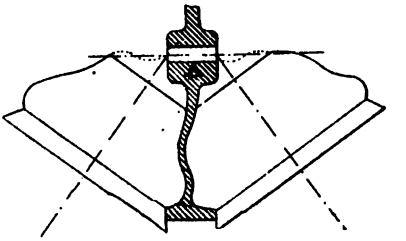


Fig. 234



Les rouleaux à rainures peuvent aussi être coniques *(fig. 214)*.

Les profils de l'un des cylindres peuvent être sur un plateau qui correspond à l'autre cylindre *(fig. 215* et *216)*.

Le plateau peut être fixe et le cylindre, en même temps qu'il tourne, possède un mouvement progressif. Ou bien la plaque se déplace quand le cylindre tourne.

On peut obtenir aisément, ainsi, des barres coniques *(fig. 217* et *218)*.

Dans certains cas, lorsque le profil doit changer sur plusieurs faces, on emploie une combinaison de trois, quatre cylindres *(fig. 219* et *220)*.

Nous retrouverons cette disposition appliquée pour le laminage des verges à clous *(fig. 221)*.

Les rainures des cylindres peuvent présenter des empreintes à volonté.

Des cylindres ou galets multiples disposés comme *(fig. 222* et *224)* permettent de façonner coniques les bouts des tubes ou barres ou de les étirer coniques sur toute leur longueur, la barre se déplaçant longitudinalement sur toute sa longueur pour une rotation de chaque galet.

Laminage intermittent. — Le laminage d'une pièce exige plusieurs passages qui ont lieu d'une façon intermittente, soit en faisant repasser constamment la pièce dans le même sens entre les cylindres d'un laminoir dit duo ordinaire *(fig. 225)*, soit en la faisant passer alternativement dans les deux sens entre les cylindres d'un duo reversible *(fig. 226)* ou entre ceux d'un trio *(fig. 227)*.

Laminage continu. — Parfois la pièce est achevée par un seul passage entre une série de cylindres disposés à la suite les uns des autres *(fig. 228)*. C'est le procédé de laminage dit continu, particulièrement adopté pour les minces épaisseurs et les longues pièces telles que : bandes, fils dits verges. Les section s décroissent progressivement et les vitesses des cylindres sont réglées en conséquence. Les laminoirs continus de ce genre

comportent souvent des cylindres à axes verticaux alternant avec des cylindres horizontaux.

Laminage sans fin. — Le laminage continu est aussi appliqué entre deux cylindres lorsque la pièce affecte une forme qui s'y prête, comme, par exemple, dans l'étirage d'un anneau qui emboîte l'un des cylindres *(fig. 229)*, et que l'on transforme en bande sans fin que l'on guide au moyen d'un galet de tension qui se déplace à volonté. On peut ainsi obtenir des barres, des bandes de grande longueur rapidement en une chaude.

Ce laminage sans fin est appliqué à la fabrication des bandages des roues de véhicules, des rondelles cornières pour chaudières, pour tonneaux, des viroles ordinaires ou ondulées *(fig. 230 à 232)*. Afin d'obtenir la régularité voulue, des galets auxiliaires guident et règlent la courbure *(fig. 230)*. Le laminage sans fin se retrouve encore dans la fabrication des formes de révolution telles que celle d'une roue, d'un disque entre deux galets coniques ou de profil correspondant à celui de la pièce A *(fig. 233)*. Dans le cas de la *figure 230* l'axe de la pièce est parallèle aux axes des cylindres, les différences de vitesses au contact des parois ne donnent pas lieu à des glissements anormaux si l'un des cylindres est libre de prendre la vitesse de la surface en contact avec lui; mais, lorsque *(fig. 234)* l'axe de rotation de la pièce est oblique ou perpendiculaire aux axes des cylindres lamineurs, tous deux commandés ou non, il se produit des glissements si le profil n'est pas rectiligne, et si les outils ne sont pas des cônes *(fig. 233)* satisfaisant à la relation $\frac{r}{r_1} = \frac{r'}{r'_1}$.

Dans ce procédé de laminage, les pressions et le mouvement des cônes ont pour effet d'étendre le métal vers le pourtour et dans le sens circonférentiel, de sorte que les fibres se disposent en spirales, forme convenable pour les pièces rotatives transmettant des efforts de torsion.

Il faut, si possible, que la pièce soit pressée sur toute la longueur du rayon, donnant ainsi des réductions d'épaisseur

égales ou variables avec le mode de déplacement des cônes lamineurs, qui sont ou mobiles longitudinalement, ou latéralement, ou angulairement, ou encore, prennent plusieurs de ces mouvements, en même temps, de manière à régler la réduction d'épaisseur suivant le profil à obtenir et dans les meilleures conditions en vue d'éviter, ou de réduire, les glissements, lorsque le profil n'est pas rectiligne. Dans ce dernier cas, on opère par cônes-lamineurs qui exercent leur action partiellement et le laminage devient défectueux, sinon impossible. Il détermine des tensions ou des compressions excessives dans le métal qui ne peut se déplacer librement, retenu, soit par les couches extérieures, soit par le noyau central. Les efforts intérieurs et extérieurs tendent alors à déchirer le pourtour ou à gondoler la pièce si elle est peu épaisse. Il faut opérer à des températures pour lesquelles le métal est très ductile et très malléable, en donnant aux outils et à la pièce une grande vitesse ayant pour effet de développer dans la pièce des tensions centrifuges favorables à l'étirage.

Ce procédé de laminage peut être adopté avec avantage pour des profils rectilignes, par exemple, pour achever les tôles circulaires dont l'épaisseur doit être plus forte au milieu que sur les bords ou inversement, pour les scies circulaires dont l'épaisseur décroît légèrement du pourtour au centre.

Dans le cas de profils variés, tels que celui d'une roue à toile pleine, droite ou ondulée, un dégrossissage prononcé donnerait lieu à des glissements considérables; aussi, préfère-t-on ébaucher ces pièces, au plus près, au moyen de matrices, le laminage régularisant simplement les surfaces et ne s'appliquant qu'aux parties principales. De plus, si on fait usage d'un laminoir dont les axes des cylindres sont parallèles *(fig. 235)*, on a soin de donner à l'ébauche une surépaisseur croissante du centre vers le pourtour *(fig. 236)*. Le travail de laminage se faisant, tout d'abord, vers le pourtour, les parties moins

épaisses ne venant en contact avec les cylindres que vers la fin de l'opération, on évite la production des déchirures.

Il est toujours préférable d'employer des cônes à axes concourants.

Fig 235

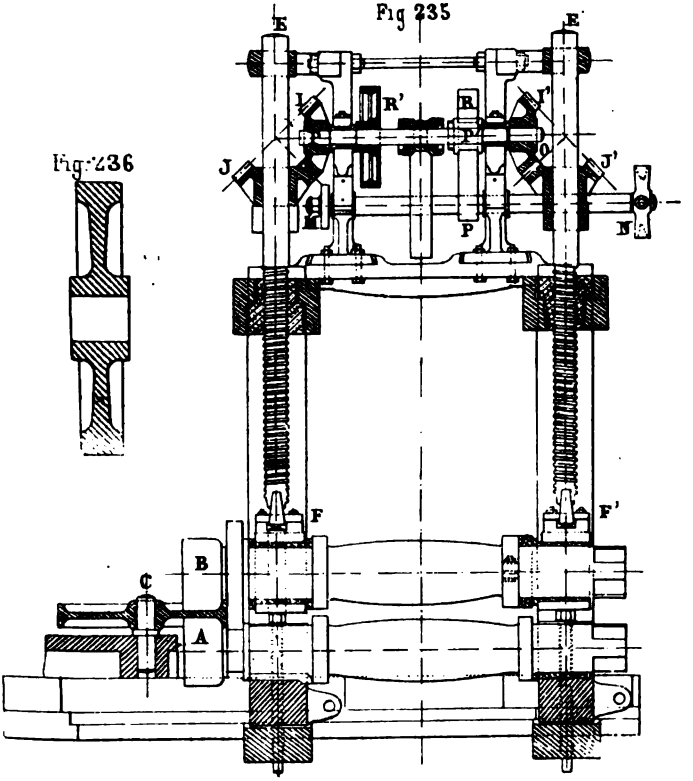


Fig. 236

Déformations de laminage entre cylindres lisses.

Les déformations produites par le laminage entre deux cylindres lisses parallèles sur une barre libre latéralement sont plus ou moins accusées suivant la réduction d'épaisseur et

suivant les dimensions de la pièce par rapport au diamètre des cylindres.

Les *figures 237 à 242* se rapportent à une éprouvette de plomb de 30^{mm} de largeur dont l'épaisseur 20^{mm} a été réduite en un seul passage à 10^{mm}, entre des cylindres de 100^{mm} de diamètre.

Pour obtenir une réduction aussi prononcée d'un seul coup, il a fallu projeter sur les cylindres et sur la pièce de la potée d'émeri et aider à l'entraînement de l'éprouvette par les cylindres dont le frottement n'était pas suffisant.

L'éprouvette était sillonnée de lignes rectangulaires entre elles permettant de juger des déformations. La pression entre les deux cylindres étant produite au repos, vers une extrémité, la pièce subit une déformation partielle.

La partie à gauche du plan *ab* accuse des déformations analogues à celles dues à des pressions ordinaires directes. Le plan *ab* a pour ainsi dire conservé toutes ses molécules; c'est un plan de symétrie avant la mise en marche des cylindres. A gauche de ce plan, la pression s'est simplement exercée sans laminage, toutes les faces non en contact avec les cylindres se sont courbées, sont devenues convexes en se réduisant sur épaisseur, la largeur de la pièce augmentant, de même que la longueur de la partie considérée, ainsi que le montrent les lignes dont l'écartement s'est agrandi.

Le mouvement ayant lieu, la partie qui se dégage des cylindres ne se modifie pas; dans la partie qui s'engage, il se détermine une zone de déformation à régime constant.

A droite du plan *ab*, dans la partie laminée, la pièce s'est élargie et allongée régulièrement.

Bien que la pression fût relativement grande, les cylindres étant de petit diamètre et l'épaisseur primitive relativement forte, les faces latérales se sont creusées (coupe *cd*) (1). Les

(1) La même réduction d'épaisseur faite par un seul passage entre des cylindres de 0,800 de diamètre donne des faces latérales convexes comme

Laminage d'une éprouvette de plomb de 20 m/m d'épaisseur réduite à 10 m/m

Fig 237 Elévation

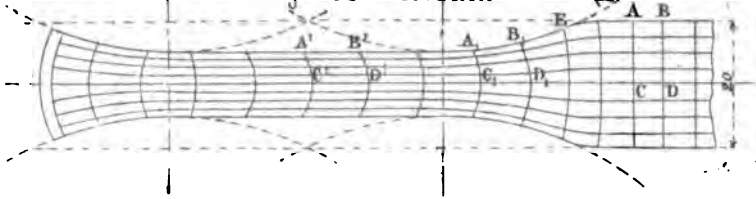


Fig 239 Vue de côté

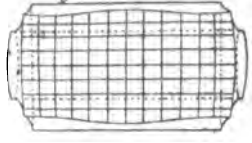


Fig 238 Plan

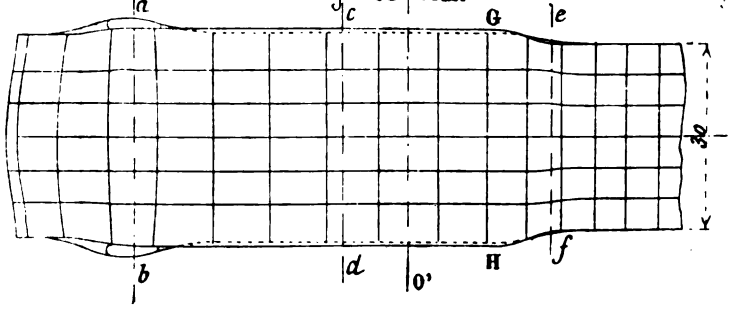
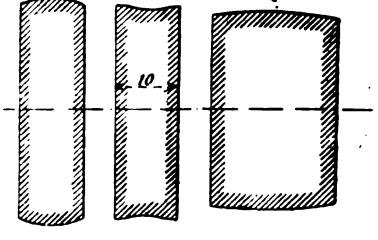


Fig 240 Fig 241 Fig 242

Coupes sur



lignes verticales se sont infléchies à droite; les lignes des faces pressées sont restées sensiblement droites, sauf vers les arêtes où elles se raccordent avec les lignes des faces de côté. Le métal s'est écoulé davantage dans les deux tranches horizontales parallèles extérieures en contact avec les cylindres, et suivant la largeur; l'épaisseur de ces tranches est plus réduite que celle des autres sur les faces de champ *(fig. 237)*. Cette réduction plus grande s'accuse dès le commencement de l'action des cylindres, après le premier contact en E. La pression vers ce point agissant rapidement, avec grande intensité, refoule le métal tout en l'entraînant.

Ces deux actions se font particulièrement sentir vers l'extérieur et dès qu'une largeur de division se trouve engagée sous les cylindres, elle a pris une dimension qui ne se modifie que très peu sous les autres efforts de compression de moindre intensité, que le métal subit par suite du ralentissement de la vitesse de compression. Dès l'engagement, le métal vers l'extérieur se trouve entraîné par le frottement énergique que produit le déplacement des molécules, les lignes des faces latérales s'infléchissent dans le sens du mouvement; le métal du milieu reste en arrière accusant une flexion transversale d'autant plus prononcée que l'épaisseur se réduit.

Vers le passage sur la ligne des centres OO', la pression est très réduite si le métal est peu élastique, la déformation conserve sa forme, tandis que si la matière était très élastique, comme le caoutchouc, la pièce reprendrait sa forme primitive; toute la partie laminée reprendrait sa longueur et sa section premières à partir du point où la pression des cylindres n'exercerait plus son action.

---

dans la coupe *ab* et un élargissement plus prononcé, ce qui montre l'influence du diamètre sur la déformation. Le rapport du diamètre à l'épaisseur est très variable; ainsi, les gros cylindres pour plaques de blindage ayant 1^{m} de diamètre et exerçant leur action sur des épaisseurs supérieures à 1^{m}, laminent dans des conditions moins favorables au début que vers la fin du laminage, l'épaisseur étant réduite, par exemple, à 0^{m},20.

Avec un métal conservant un peu d'élasticité, il y aur donc une tendance au redressement des lignes courbées, ce q n'est guère sensible avec les métaux malléables. La différen d'épaisseur des couches horizontales est d'autant plus pr noncée que la pièce est moins large, les creux ou les renfl ments latéraux prenant une importance relative d'autant pl faible que la pièce est plus large. Les renflements des abo sont tout à fait négligeables et n'ont pour ainsi dire aucun ef sur cette différence d'épaisseur. Cependant, lorsqu'on lami de faibles épaisseurs superposées, les pressions détermine des forces ou composantes plus obliques au milieu qu'à l'ex rieur; les molécules n'étant plus intimement reliées, l'écoul ment du métal, plus accentué au milieu, prend une importan telle, qu'il y a lieu de modifier la position des pièces en disposant à tour de rôle au milieu et à l'extérieur. De plus, le métal est chaud, la température étant plus élevée au mili que vers l'extérieur, les feuilles du milieu s'allongent dava tage. L'effet est moindre en largeur; l'action du mouvemer la direction des réactions ayant une tendance à diriger l molécules longitudinalement, à s'opposer à l'épanouissement métal dans toutes les directions, ainsi que le fait une pressi directe, normale, agissant lentement.

L'effet d'entraînement est plus favorable à l'étirage, les pre sions sont favorables à l'élargissement et au serrage des molécule

Dans l'éprouvette considérée, remarquons encore que l lignes longitudinales des larges faces sont symétriques deux deux par rapport à la ligne du milieu qui se trouve dans u plan de symétrie longitudinal. Ces lignes sont plus écartées d côté des faces de champ, vers les arêtes, que vers le milieu cela se conçoit assez, attendu que le métal est plus libre de côté.

L'élargissement se produit avant l'entrée, avant le contact d cylindres, par l'effet de l'entraînement des parties déjà eng gées, et aussi par l'effet des pressions qui est particulièreme

caractérisé par le renflement des faces latérales dans la coupe *ef*. Les pressions se font surtout remarquer par cette déformation plus centrale qui déterminerait une forme analogue à celle du bout d'entrée si le métal était libre, si l'éprouvette se terminait à cet endroit.

On voit aussi qu'un peu après son entrée entre les cylindres, l'élargissement de l'éprouvette a pris presque toute sa valeur; les cylindres étant de petit diamètre les couches extérieures se sont plus épanouies que les couches du milieu, les faces latérales, d'abord concaves, sont devenues convexes, coupe *cd*.

Ce phénomène d'élargissement restant constant avant le passage sur la ligne des centres OO′ démontrerait qu'à partir de la ligne GH, le frottement au contact des cylindres serait plus grand que les pressions ou efforts qui tendent à élargir la pièce; qu'à partir de ce point, la réduction d'épaisseur se fait seulement par entraînement, par étirage dans le sens longitudinal, ce qu'accuse, d'ailleurs, la progression de l'écartement des lignes verticales tracées sur les faces latérales, lignes qui s'infléchissent de plus en plus en prenant leur écartement définitif au passage sur la ligne des centres.

Les lignes transversales telles que GH restent droites, leur écartement à partir de l'entrée croît rapidement, de même que pour les lignes telles que EE; l'écartement définitif a également lieu suivant OO′; mais, à partir de GH, on voit que le glissement relatif ou plutôt l'élargissement d'écrasement est faible.

Remarquons aussi que les longueurs telles que AB et CD. égales entre elles avant le laminage, deviennent A′B′ = C′D′ après le passage de la ligne des centres OO′; mais l'égalité n'existe pas pendant la déformation: la ligne d'arête AB s'allonge plus rapidement que la ligne médiane CD, et cela, par l'entraînement des cylindres; puis la longueur telle que A_1 B_1 ne pouvant plus guère varier par suite de l'adhérence du métal avec le cylindre, c'est la ligne CD, qui s'allonge

davantage par entraînement du métal et par pression c outils.

Cet allongement, dû à la pression, se fait donc sentir dava tage sur le plan médian horizontal que sur les autres; s'exerce dans toutes les directions; en largeur comme longueur, et les effets des pressions intérieures développé déterminent un faible complément de largeur difficile à estim et un complément de longueur relative que l'on mesure fa lement.

Par complément de longueur relative, il faut entendre qu se produit un débit de la pièce légèrement plus grand q celui qui devrait correspondre à la vitesse circonférentielle c cylindres.

Cet allongement, que nous désignerons : *allongement de pr sion*, provient du déplacement au delà de la ligne des centr alors que le métal, devenu plus libre, n'offre plus qu'une fail résistance à l'écoulement en avant des parties voisines sc mises à la pression des cylindres (1).

Un déplacement analogue plus important, mais constitua un recul, un retard à l'engagement du métal, se produit du c de l'entrée, quand l'adhérence, encore insuffisante pc entraîner le métal, laisse glisser le cylindre à cet endroit; plutôt, lorsque la pression fait épanouir le métal; car, on pe concevoir que le métal fortement pressé, s'étende de proche proche sur toute la surface de contact et dans le sens du mo vement, sans pour cela produire de patinage proprement d lequel aurait, au contraire, pour effet de donner un dé inférieur à la vitesse circonférentielle.

---

(1) M. Deny (*Annuaire* 1877) a constaté une différence de 54^{mm}, sur développement de 729^{mm}, pour une barre de fer chauffée au rouge cer (La différence peut varier de 1 à 8 0/0, suivant l'épaisseur et la réduct d'épaisseur.)

M. Lambert (*Bulletin* d'octobre 1877) a relevé des différences de 2 à 4 sur des plaques de laiton à froid. Nous signalerons plus loin, dans essais, des valeurs variant pour le plomb de 1,5 à 6,5 0/0.

Un phénomène qui frappe dans l'action du laminage est la faible valeur de l'élargissement de l'éprouvette comparativement à son allongement.

Pour se rendre compte de cet effet, il faut d'abord considérer la courbure des outils donnant lieu à des réactions symétriques dont les résultantes sont longitudinales et non transversales. de sorte que le métal est faiblement sollicité à s'étendre en largeur. L'élargissement n'est, pour ainsi dire, dû qu'aux composantes verticales des pressions partielles ou réactions; il est contre-balancé par le frottement des cylindres. De plus, le frottement de ceux-ci a une action prépondérante dans le sens du mouvement et précisément à cause de ce mouvement (1), il s'ensuit que le métal se déplace dans le sens longitudinal.

Comme il n'y a pas de composante de vitesse dans le sens de la largeur, il n'y a pas déplacement dû à l'adhérence.

On conçoit, par exemple, que l'élargissement serait plus grand si le déplacement de la pièce se faisant longitudinalement, les cylindres agissaient obliquement. C'est ce qui se produit, d'ailleurs, lorsque la pièce passe obliquement entre les cylindres.

La pratique a aussi montré que l'entraînement dans le sens longitudinal est favorisé par les grandes vitesses et les petits diamètres; qu'au contraire de grands diamètres de cylindres et une faible vitesse déterminent un élargissement plus prononcé. Si la vitesse est nulle, début de la déformation *(fig. 237)*, l'élargissement est maximum, les composantes de frottement dans le sens du mouvement n'ayant pas d'influence.

Lorsque l'extrémité de la pièce est sur le point de passer entre les cylindres, le déplacement de pression s'accuse nettement, ainsi que le montrent les *figures 243 à 245* du bout de

(1) On sait que dans tout mouvement décomposé suivant deux directions, les effets d'adhérence ou de frottement sont proportionnels aux vitesses des composantes du mouvement. Or, dans le laminage, la composante transversale est nulle, donc tout l'effet de l'adhérence se produit longitudinalement.

sortie. Le métal étant libre, l'about s'épanouit en queue de poisson, les sommets surtout s'étendent et l'arête des faces de champ se creuse fortement *(fig. 243)*.

Fig. 243

Fig. 244

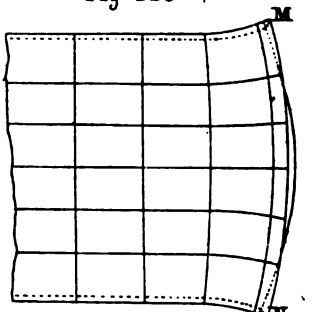
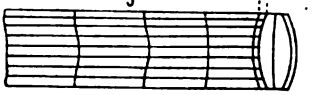


Fig. 245



Au contraire, la partie du milieu de la face d'about se bombe, la pression agissant avec tout son effet.

Le déplacement de pression donne à l'arête MN une courbure assez prononcée qu'affectent aussi les autres lignes transversales avec une courbure moindre jusqu'à la ligne conservant forme rectiligne. De même, les lignes longitudinales s'écartent par entraînement de pression pour suivre les lignes d'arête.

TRAVAIL MÉCANIQUE DE LAMINAGE

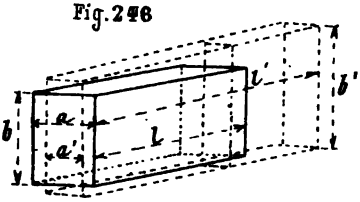
Il est très difficile, sinon impossible dans beaucoup de cas, de déterminer exactement les éléments du travail de laminage. Il faut se baser sur des données d'expériences et on ne peut appliquer le calcul que dans des cas simples, tels que celui du laminage entre cylindres lisses.

Il faut tenir grand compte de l'état de malléabilité du métal, de la température, quand on opère à chaud. Il n'est guère possible, par exemple, d'évaluer le dégagement de la chaleur de la pièce, ou la chaleur produite par le laminage lui-même, chaleur qui est assez considérable et s'oppose à un refroidissement rapide qui motiverait des réchauffages plus nombreux.

Le laminage doit se faire à des températures élevées s'il

s'agit de cuivre, de fer, d'acier, etc., alors que le métal possède son maximum de malléabilité, et présente la plus faible résistance aux outils tout en conservant une grande ductilité. Le laminage produit à la fois un allongement et un aplatissement de la pièce supposée prismatique. De même que pour la compression et le martelage, le rapport de l'allongement à l'aplatissement varie avec la courbure de l'outil, le rayon des cylindres, et avec l'épaisseur de la pièce; plus le rayon est grand et l'épaisseur forte, plus est relativement grand l'élargissement (voir essais plus loin.)

Fig. 246



Pour transformer par laminage une pièce de dimensions primitives *abl* en une autre de dimensions finales *a'b'l' (fig. 246)*, il faut développer un travail mécanique sensiblement proportionnel au volume du métal déplacé de l'espace primitif; de sorte que, si L est un coefficient de laminage obtenu par des expériences dans des conditions analogues sur des éprouvettes de dimensions semblables, on peut poser pour expression générale du travail T :

$$T = L\big(a'b'(l'-l) + (b'-b)\,a'l\big) = L(ab'l' - a'bl) = \big(a'(b'l' - bl)\big)\,L,$$

pour $b = b'$

$$T = L\big(a'b(l' - l)\big).$$

Ce coefficient L varie avec les conditions très diverses du laminage. Des opérations directes seules permettent de le déterminer.

Cependant, en considérant les éléments qui concourent à la déformation, on peut approximativement établir des relations qui permettent de se rendre compte des meilleures proportions à donner aux organes, des pressions, des frottements qui s'exercent sur les cylindres, de l'énergie nécessaire au laminage.

Afin de simplifier la question, nous considérerons le cas de

deux cylindres lisses de même rayon r produisant des actions symétriques par rapport à l'axe longitudinal de la barre.

La densité du métal étant supposée constante, les volumes restent égaux : $abl = a'b'l'$.

Le laminage produit une augmentation de longueur $l' - l$, une augmentation de largeur $b' - b$, une réduction d'épaisseur $a' - a$, une réduction de section $ab - a'b'$.

On a aussi les relations de dimensions :

$$\frac{ab}{a'b'} = \frac{l'}{l} ; \qquad \frac{ab - a'b'}{a'b'} = \frac{l' - l}{l} ;$$

plus la réduction de section sera grande, plus l'augmentation de longueur le sera également.

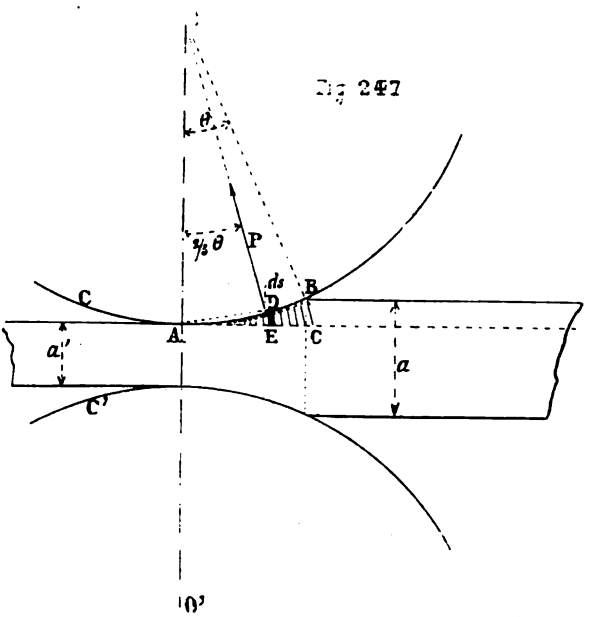
Si la largeur b est relativement grande par rapport à l'épaisseur a, l'élargissement $b' - b$ sera faible et négligeable ; posant dans ce cas $b = b'$ il vient $\frac{a - a'}{a'} = \frac{l' - l}{l} = \lambda$; c'est le coefficient dit d'*étirage proportionnel*.

En admettant aussi que l'adhérence des cylindres est telle qu'il ne se produise pas de glissement, de patinage, la barre se trouve entraînée à la sortie avec la vitesse circonférentielle ωr ou avec une vitesse très peu supérieure provenant des effets de compression.

Les cylindres peuvent être assimilés à des rouleaux roulant sur la pièce supposée fixe. Considérons le cylindre C en contact, suivant l'arc AB, avec le métal *(fig. 247)*. Un déplacement élémentaire du cylindre C se fera comme s'il tournait autour de A comme centre ; les différents points de l'arc AB parcourront des chemins proportionnels à leur distance au point A. On peut admettre l'hypothèse que les pressions qui se produisent en les divers points de AB, projection de la surface du cylindre, sont proportionnelles à ces chemins ou à leurs distances au point A ; de sorte que la pression se trouve être maximum vers le point B, minimum et égale à zéro au point A, si toutefois on suppose que le métal, dépourvu d'élasticité, ne

peut réagir suivant la ligne des centres OO', et si, de plus, on suppose que la réduction est faible par rapport à l'épaisseur de la pièce.

Notons que les réactions du métal sur AB sont analogues à celles que déterminerait une compression directe, qu'elles varient avec la nature et l'état de malléabilité du métal et *aussi avec la vitesse* d'action du cylindre. Les valeurs de ces réactions



ne peuvent être déterminées que par des essais directs de laminage qui ne donneraient, d'ailleurs, que leur résultante : ou bien, il faudrait déterminer par des essais de compression les lois de progression de ces réactions *à différentes vitesses*, et sur les métaux à chaud ou à froid, aux différentes températures de laminage et sur des épaisseurs variables. Ces essais, très longs et très difficiles à réussir, ne conduisent qu'à des approxima-

tions, à des valeurs qui ont été indiquées aux essais de compressions.

L'hypothèse de la progression des pressions proportionnellement à la distance des points considérés au point A, concorde assez avec la réalité, attendu que la vitesse de pénétration du cylindre, d'aplatissement du métal, varie aussi suivant cette distance.

La variation des réactions normales au cylindre C est donc représentée par la variation des droites telles que BC, DE, limitées à l'arc AB, qui est pratiquement une corde, et à la droite AC *(fig. 247)*.

Soit p' la pression par unité de longueur de génératrice, sur un élément ds de l'arc AB ; la pression sur cet élément sera $p'ds$, elle sera proportionnelle au petit rectangle hachuré de côtés ds et DE, ce dernier représentant p'. La somme des pressions telles que $p'ds$ sera représentée par le triangle ABC et aura pour valeur

$$\text{arc AB ou corde AB} \times \frac{BC}{2} = r\theta \frac{BC}{2}.$$

Si BC correspond à une pression connue p_1, ou si $\frac{BC}{2}$ correspond à la pression moyenne p s'exerçant au milieu de AB, on pourra poser que la résultante P des pressions sur AB et sur l'unité de longueur de génératrice, est égale à

$$P = r\theta \frac{p_1}{2} = r\theta p.$$

Or $$r\theta = AB = \sqrt{2r\left(\frac{a - a'}{2}\right)},$$

soit encore $$P = p\sqrt{r(a - a')}.$$

Cette résultante P passera par le centre O puisque toutes les composantes passent par ce point. Son point d'application sera en un point très voisin de AB ou de l'arc s, sa distance AD sera déduite de la relation des moments pris par rapport

au point A, soit, en posant, si y est la distance d'une pression $p'dy$,

$$P \times AD = \int_0^s dy p' y;$$

or $\frac{p'}{p_1} = \frac{y}{AB} = \frac{y}{s}$, d'où $p' = \frac{p_1}{s} y$;

remplaçant, il vient

$$P \times AD = \int_0^s \frac{p_1}{s} y^2 dy = \frac{p_1 s^3}{3s} = \frac{p_1 s^2}{3};$$

d'autre part $P = \frac{s p_1}{2}$,

soit $AD = \frac{2s}{3} = \frac{2r\theta}{3}$.

L'angle AOD est donc égal à $\frac{2}{3}\theta$.

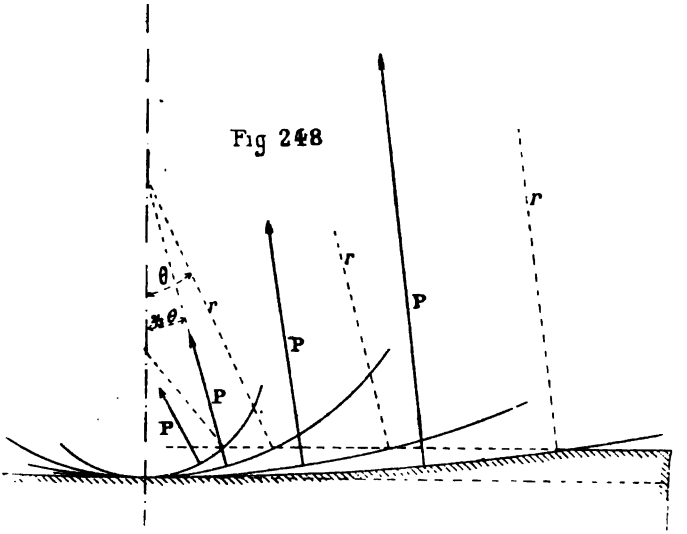
Remarquons que la pression totale P varie avec le rayon du cylindre et avec l'angle θ, la pression moyenne p étant supposée rester constante pour une même réduction d'épaisseur $a - a'$. Comme l'angle θ varie peu, en décroissant, quand r augmente dans une certaine limite, il s'ensuit que la pression P est proportionnelle à $r\theta = \sqrt{r(a - a')}$.

D'autre part, plus le rayon est petit, plus les réactions principales s'inclinent pour donner des composantes favorables au déplacement longitudinal du métal. Il s'ensuit, ainsi que l'a reconnu depuis longtemps la pratique, que l'étirage au laminoir se fait plus rapidement avec de petits cylindres qu'avec des gros.

Comme généralement, dans les mécanismes de commande, les pertes de travail dues aux frottements sont plus grandes, pour une même quantité d'énergie transmise, avec de grands efforts qu'avec des petits, il est aussi plus économique de

laminer avec des petits cylindres qu'avec des gros. C'est ce que feront ressortir les essais signalés plus loin.

Fig 248



La *figure 248* montre pour des variations du rayon r celles des arcs de contact, et la progression des pressions P.

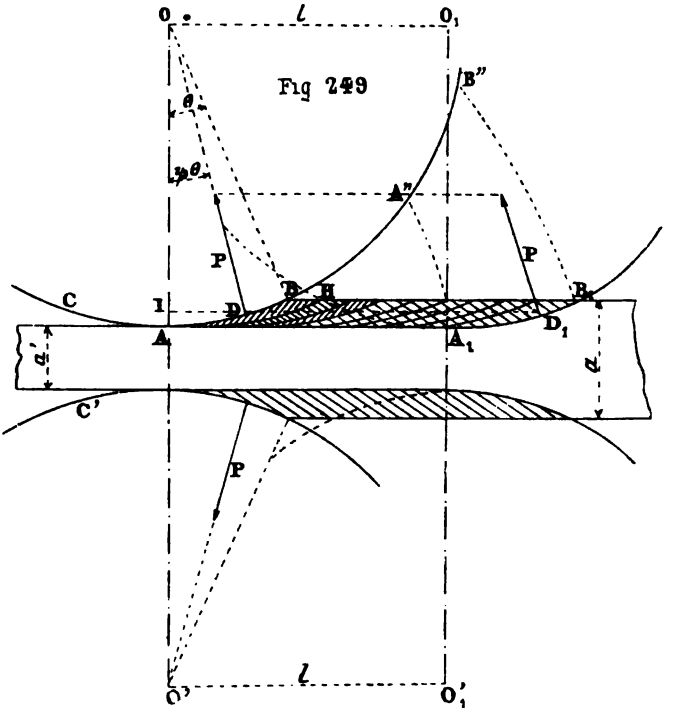
Énergie de laminage.

Pour estimer le travail mécanique du laminage, il faut considérer le travail des résultantes P sur les deux cylindres C et C'.

Dans le déplacement relatif de la pièce et du cylindre C *(fig. 249)*, l'arc de contact AB reste constant. A mesure qu'une rotation élémentaire se fait autour du point A, qui se déplace suivant AA_1 (en supposant le roulement de C sur AA_1), de nouveaux points du cylindre, situés au delà du point B, viennent successivement prendre contact. Leur vitesse d'abaissement étant grande, la pression, partant de zéro, arrive rapidement à sa valeur maximum.

Il s'ensuit que la résultante P conserve une valeur cons-

tante, que le travail élémentaire représenté par la surface ABH reste constant pour des déplacements élémentaires égaux, que la somme de toutes les surfaces élémentaires comprises entre deux positions O et O_1 du centre du cylindre C, est proportionnelle au travail développé, que cette surface hachurée correspond précisément au volume de métal déplacé. Par unité



de longueur de génératrice, et pour les deux cylindres, ce volume est donc égal à

$$AA_1(a - a') = OO_1(a - a').$$

La résultante P se déplaçant parallèlement à elle-même, son point d'application décrit la droite DD_1, faisant un angle $\left(90^o - \frac{2}{3}\theta\right)$ avec la direction de P.

Le travail de cette force, si v est la vitesse du point d'application D, sera

$$Pv\cos\left(90^\circ - \frac{2}{3}\theta\right) = Pv\sin\frac{2}{3}\theta\,;$$

pour les deux cylindres, le travail total de laminage par seconde est

$$T = 2Pv\sin\frac{2}{3}\theta.$$

Or, la droite DD_1 étant égale à la droite AA_1 développement de l'arc AA'', la vitesse v est donc celle du cylindre à sa surface; de sorte que si t est le nombre de tours par minute, il vient

$$T = \frac{4\pi rtP}{60}\sin\frac{2}{3}\theta.$$

Exprimant $\sin\frac{2}{3}\theta$ en fonction de r et de $a - a'$, on peut poser

$$r\sin\frac{2}{3}\theta = DI = \sqrt{(2r - AI)AI} = \sqrt{\left(2r - \frac{2}{3}\frac{a-a'}{2}\right)\left(\frac{2}{3}\frac{a-a'}{2}\right)}$$

$$= \sqrt{\frac{2r\,(a-a')}{3} - \frac{(a-a')^2}{9}},$$

soit
$$\sin\frac{2}{3}\theta = \frac{\sqrt{\frac{2r\,(a-a')}{3} - \frac{(a-a')^2}{9}}}{r}$$

et
$$T = \frac{4\pi tP}{60}\sqrt{\frac{2r\,(a-a')}{3} - \frac{(a-a')^2}{9}};$$

d'autre part,
$$P = p\sqrt{r\,(a-a')},$$

remplaçant dans l'expression de T, on a :

$$T = \frac{4\pi rtp\sqrt{r\,(a-a')}\left(\sqrt{\frac{2r\,(a-a')}{3} - \frac{(a-a')^2}{9}}\right)}{60r}$$

$$= \frac{4\pi rt}{60}\left(p\,(a-a')\sqrt{\frac{2}{3} - \frac{a-a'}{9r}}\right)$$

Le terme $\frac{a - a'}{9r}$ peut être négligé et la relation du travail par seconde sur l'unité de largeur de la pièce devient :

$$T = \frac{4\pi rtp}{60}(a - a')\sqrt{\frac{2}{3}} = 0{,}17rtp\,(a - a').$$

En fonction de la vitesse $v = \frac{2\pi rt}{60}$, on aurait

$$T = 2vp(a - a')\sqrt{\frac{2}{3}} = 1{,}6\,vp(a - a').$$

Pour une longueur de laminage donnée $AA_1 = l$ et une largeur de pièce égale à b, le travail serait

$$T = 1{,}6\,plb\,(a - a') = 1{,}6p \text{ (volume déplacé)}.$$

Pour la compression transversale simple, nous avons trouvé

$$T = 2p \text{ (volume déplacé)}.$$

Il s'ensuivrait que les énergies effectives de laminage et de pressage dépensées pour produire un étirage donné, la pression p étant égale, seraient dans le rapport $\frac{1{,}6}{2}$.

L'énergie nécessaire au laminage direct dépend tout particulièrement de la pression moyenne p. Ainsi que nous l'avons vu pour le cas de compression directe simple, la pression p est variable avec la réduction d'épaisseur $(a - a')$ de la pièce; elle est plus grande pour des pièces minces que pour des pièces épaisses; elle varie aussi avec la vitesse d'aplatissement, avec la vitesse circonférentielle.

Cette action de la vitesse serait moins sensible avec de gros cylindres qu'avec des petits; l'aplatissement se faisant sur une plus grande étendue, sur un plus grand arc de contact avec les gros qu'avec les petits, le métal se trouve refoulé moins rapidement.

Le travail mécanique de laminage proprement dit, sans tenir compte des frottements des organes, serait, dans les limites de

la pratique, indépendant du diamètre des cylindres, la vit restant la même.

Si on fait intervenir le travail de frottement des tourill des cylindres, le rendement de laminage dépend particuli ment de la réduction d'épaisseur.

Le frottement sur les tourillons est dû à la pression P laminage. Cette pression s'exerce par moitié sur chaque t rillon d'un cylindre. Si f' est le coefficient de frottem r' le rayon des tourillons, v' la vitesse circonférentielle travail de frottement est égal pour les deux cylindres à

$$T' = 2Pf'v' = 4Pf\frac{\pi r' t}{60}.$$

Le travail de laminage étant

$$T = \frac{4\pi rtP}{60}\sin\frac{2}{3}\theta,$$

le rapport de ces travaux serait

$$\frac{T'}{T} = \frac{r'f'}{r\sin\frac{2}{3}\theta} = \frac{r'f'}{\sqrt{\frac{2r\,(a-a')}{3} - \left(\frac{a-a'}{3}\right)^2}}.$$

L'effet utile du laminage, avec deux cylindres donnés, d'autant plus élevé que ce rapport sera plus petit, c'est-à- que $a - a'$ ou réduction d'épaisseur par passage sera grande. Il convient donc de laminer par un petit nombr passes plutôt que par de nombreuses passes.

Si l'effort moteur Q de chaque cylindre s'exerce *(fig.* sur un bras de levier L, on a la relation d'équilibre :

$$2QL = 2r'Pf' + 2P'\left(r\cos\frac{2}{3}\theta\right) = 2Pr'f' + 2Pr\sin\frac{2}{3}\theta\cos\frac{2}{3}\theta$$

$$= P\,(2r'f' + r\sin$$

Comme application, considérons le passage d'une plaque de fer à haute température d'épaisseur primitive $a = 50^{mm}$ réduite à $a' = 40^{mm}$, de largeur $b = 2000^{mm}$, la pression moyenne par millimètre carré étant $p = 10^{kg}$, le rayon des cylindres $r = 400$, le rayon des tourillons $r' = 300$, le nombre de tours par minute $t = 40$.

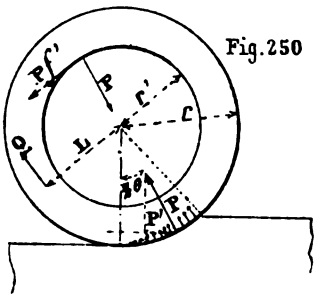


Fig. 250

La pression totale ou résultante des réactions du métal sur chaque cylindre serait :

$$P = bp\sqrt{r(a-a')} = 2000 \times 10 \times \sqrt{400 \times 10} = 1.260.000^{kg}.$$

L'énergie de laminage par seconde serait :

$$T = 1{,}6\,bvp(a-a') = 1{,}6 \times 2000 \times \frac{3{,}14 \times 0{,}40 \times 40}{30} \times 10 \times 10 = 512.000^{kgm}.$$

Le travail de frottement sur les quatre tourillons des outils serait pour $f' = 0{,}1$

$$T' = \frac{4Pf'\pi r't}{60} = \frac{4 \times 1260000 \times 0.1 \times 3{,}14 \times 0.300 \times 40}{60} = 316.500^{kgm}.$$

Soit un rapport $\frac{T'}{T} = \frac{316.500}{512.000} = 0{,}62.$

Supposons encore une plaque de cuivre laminée à froid et pour laquelle on a $p = 40^{kg}$, $a = 10^{mm}$, $a' = 8^{mm}$, $b = 400^{mm}$, $r = 250$,

$$v = \frac{2\pi rt}{60} = \frac{2 \times 3{,}14 \times 0.250 \times 30}{60} = 0^{m},785.$$

La pression sur chaque cylindre serait :

$$P = bp\sqrt{r(a-a')} = 400 \times 40\sqrt{250(10-8} = 355.200^{kg}.$$

L'énergie de laminage serait par seconde :

$$T = 1{,}6\, bvp\,(a - a') = 1{,}6 \times 400 \times 0{,}785 \times 40\,(10 - 8) = 40.202^{kgm}.$$

Le travail de frottement des tourillons de rayon $r' = 200$, le coefficient $f' = 0{,}1$ serait :

$$T' = \frac{4Pf'\pi' rt}{50} = \frac{4 \times 355.200 \times 0{,}1 \times 3{,}14 \times 0{,}200 \times 30}{60} = 44.613^{kgm},$$

soit

$$\frac{T'}{T} = \frac{44.613}{40.202} = 1{,}1.$$

Ainsi, dans ce cas, le travail de frottement des tourillons des outils serait supérieur au travail de laminage effectif.

Ces exemples montrent les grands efforts que nécessite le laminage des larges plats, des tôles, etc.

Adhérence des cylindres sur la pièce.

Nous avons admis que les cylindres ne patinaient pas sur la pièce. C'est la condition nécessaire du laminage qui, dans le cas contraire, ne se produirait pas. Il faut donc que l'adhérence des cylindres sur le métal, le frottement $2Pf = 2F$, qui est dans ce cas une force mouvante, soit suffisant pour donner lieu à une résultante $2F'$ *(fig. 251)*, dirigée suivant l'axe longitudinal de la pièce à cause de la symétrie, plus grande que la résultante des réactions normales, qui repousse la pièce; cette dernière résultante $2P'$ est également dirigée suivant l'axe de la pièce en sens opposé de la résultante $2F'$. On admet, dans ce cas, que les deux cylindres sont commandés pour l'entraînement; s'il n'y avait qu'un seul cylindre entraîneur, la résultante du frottement serait seulement égale à F' et devrait être supérieure à $2P'$.

Les compositions des réactions normales P, et des forces de frottement Pf se font comme il est indiqué sur la *figure 251*

en prenant les forces P dans leurs directions de recul de la pièce, ces réactions P donnant 2P′, et en dirigeant les frottements Pf dans leurs directions d'entraînement pour obtenir 2F′.

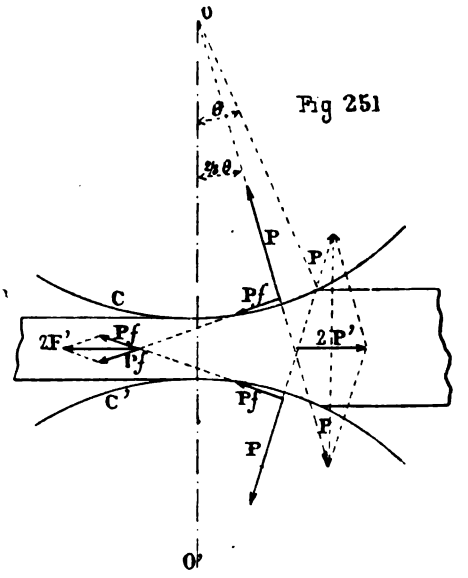


Fig 251

Lorsque 2F′ est plus grand que 2P′, l'entraînement se fait sans nécessiter d'effort supplémentaire dans le sens du mouvement.

Si 2F′ est plus petit que 2P′, il faut, soit exercer une poussée du côté de l'entrée, soit exercer une traction du côté de la sortie. La poussée est défavorable à l'étirage, tandis que la traction agit dans un sens favorable.

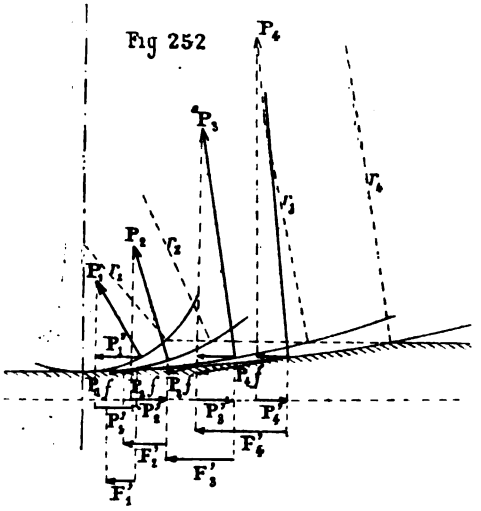
La poussée est nécessaire lorsqu'on présente la pièce aux cylindres, attendu que ceux-ci n'exerçant pas encore de pression, il n'y a pas de frottement.

Afin d'augmenter l'adhérence, l'effet d'entraînement lorsque la réduction d'épaisseur est grande, par exemple, quand on dégrossit une pièce, les cylindres sont entaillés ou présentent des saillies et des creux prononcés qui grippent la pièce et la font passer.

Les rayons des cylindres ont une grande influence sur la relation $2F' \leqslant 2P'$, parce que les réactions P croissent beaucoup avec les augmentations des rayons, tandis que les résul-

tantes $2P'$ décroissent et tendent vers zéro lorsque le rayon est infini, lorsque les surfaces de contact deviennent des plans parallèles. Au contraire, Pf et sa projection F' croissent de plus en plus, lorsque le rayon est infini; Pf devient maximum et F' lui est égal. La *figure 252* montre les variations de P, P', Pf, F' correspondant à plusieurs valeurs de r, la réduction d'épaisseur $a - a'$ restant constante. Elle se rapporte à un seul cylindre, n'indique que l'une des deux forces P pour chaque cas, donnant lieu à une force Pf et aux projections P' et F'.

Fig 252



Les forces P sont proportionnelles aux arcs de contact; les forces Pf sont à une même échelle et correspondent à une valeur $f = 0{,}3$.

Remarquons que pour le plus petit rayon r_1, F'_1 est plus petit que P'_1, il y aurait patinage; pour les autres rayons, on a: $F'_2 > P'_2$ .... $F'_4 > P'_4$, et nous voyons que l'inégalité s'accuse de plus de plus.

En vue d'éviter le patinage, il convient donc de ne pas adopter un trop petit diamètre.

Le coefficient de frottement a une action prépondérante également. Il varie pour le laminage à froid de 0,1 à 0,2 suivant l'état de poli des surfaces et la nature du métal; pour le laminage à chaud, ce coefficient s'élève et peut atteindre 0,15 à

0,2 si le métal n'est pas suant. Si le métal est pâteux, on peut admettre 0,12 à 0,15 (1). Dans le cas de cylindres striés, ce coefficient est de beaucoup supérieur.

L'influence du rayon et du coefficient de frottement ressort des relations qui existent entre les forces 2P', 2F' et les autres éléments du laminage. On voit aisément *(fig. 251)* que :

$$2P' = 2P \sin\frac{2}{3}\theta = 2p\sqrt{r(a-a')}\sin\frac{2}{3}\theta$$

$$2F' = 2Pf\cos\frac{2}{3}\theta = 2p\sqrt{r(a-a')}\,f\cos\frac{2}{3}\theta.$$

Or, $\sin\frac{2}{3}\theta$ tendant vers zéro quand r augmente indéfiniment, 2P tend aussi vers zéro.

$\cos\frac{2}{3}\theta$, tendant vers l'unité quand r augmente indéfiniment, 2F' croît rapidement et tend vers la valeur $2p\sqrt{r(a-a')}f$.

Si on suppose $2P' = 2F'$, condition voisine du patinage des cylindres, condition donnant le plus petit rayon pour une réduction $a - a'$ ou réciproquement, il vient :

$$\frac{2P'}{2F'} = \frac{\sin\frac{2}{3}\theta}{f\cos\frac{2}{3}\theta} = \frac{1}{f}\operatorname{tg}\frac{2}{3}\theta = 1,$$

soit

$$f = \operatorname{tg}\frac{2}{3}\theta = \frac{DI}{OI}.$$

Or,

$$DI = r\sin\frac{2}{3}\theta = \sqrt{2r\left(\frac{a-a'}{3}\right) - \left(\frac{a-a'}{3}\right)^2},$$

$$OI = r - \frac{2}{3}\frac{a-a'}{2},$$

(1) Ces coefficients sont plus faibles dans les cylindres finisseurs à surfaces mieux polies que celles des dégrossisseurs. Les essais de frottement direct à chaud sur des surfaces polies montrent que le coefficient de frottement a des valeurs peu différentes de celles correspondant au métal froid et que ces valeurs ne s'écartent guère de 0,15 pour le fer sur fonte. (Ces essais sur surfaces planes sont faciles à faire, nous ne voyons pas la nécessité d'en donner les résultats en détail.)

soit $$f = \frac{r \sin \frac{2}{3}\theta}{r - \frac{a-a'}{3}} = \frac{\sqrt{2r\left(\frac{a-a'}{3}\right) - \left(\frac{a-a'}{3}\right)^2}}{r - \frac{a-a'}{3}},$$

relation qui permet de déduire le coefficient de frottement f; ou bien, étant donné ce coefficient, de connaître la limite $a - a'$ de réduction d'épaisseur pour des cylindres de rayons r.

Négligeant les termes $\left(\frac{a-a'}{3}\right)^2$ et $\frac{a-a'}{3}$, très petits par rapport à r, il vient :

$$f = \frac{\sqrt{\frac{2r(a-a')}{3}}}{r},$$

d'où on tire $$a - a' = \frac{3f^2 r}{2},$$

relation qui montre bien que la réduction d'épaisseur peut être d'autant plus grande que r est grand, que cette réduction varie aussi suivant le carré du coefficient de frottement de valeur plus petite que l'unité. Ainsi, pour les valeurs de

$f =$	0,1	0,2	0,3	0,4,
on trouve $a - a' =$	0,015r	0,06r	0,135r	0,24r.

La condition de plus petit rayon serait

$$r = \frac{2(a-a')}{3f^2}.$$

Si, connaissant les réactions P, les dimensions des cylindres, leur vitesse et le coefficient de frottement f des cylindres sur la pièce dont la réduction d'épaisseur donnerait précisément lieu au patinage des cylindres, alors que 2P′ serait peu différent de 2F′, on pourrait déduire le travail de laminage de la

pièce, lorsque 2P est un peu supérieur à 2F′, en posant que ce travail est égal au travail de patinage, soit :

$$T = 2Pfv = 2Pf\omega r = 2Pv \sin\frac{2}{3}\theta = 2Pv\,\frac{\sqrt{\frac{2r(a-a')}{3}}}{r}$$

$$= 2P\omega\sqrt{\frac{2r(a-a')}{3}}.$$

Effet de l'adhérence.

Le frottement 2Pf qui s'exerce sur les deux cylindres au contact du métal entraîne d'abord les molécules voisines dans le sens de la rotation : ces molécules refoulent les parties centrales dans le sens des pressions partielles correspondantes; puis celles-ci sont ensuite entraînées à leur tour. Ces déplacements relatifs sont d'autant plus accusés que la réduction d'épaisseur est plus grande et l'épaisseur de la pièce plus faible, de sorte que, pour un même volume de métal déplacé par laminage, le travail mécanique dépensé est plus grand pour les moindres épaisseurs que pour les fortes épaisseurs de métal, ce qui a été également reconnu pour la compression directe.

L'entraînement des molécules de surface par l'adhérence des cylindres produit parfois des criques, des déchirures, particulièrement lorsque le métal est peu homogène, peu ductile, comme dans l'étirage des paquets ou des lingots plus chauds au pourtour qu'au cœur. C'est pourquoi on soude les paquets, de préférence, avec des cylindres de gros diamètre, donnant une forte pression dont la répartition sur une plus grande étendue favorise le soudage.

Les cylindres ont généralement des diamètres un peu différents (quelques centimètres de différence) ; ils tournent néanmoins avec des vitesses angulaires égales, à moins que l'un des deux soit libre.

On peut admettre que les réactions sont égales sur chacun

des deux cylindres au contact de la pièce et que l'adhérence est suffisante pour s'opposer à tout glissement. Il s'ensuit que le débit du côté du gros cylindre est plus grand que le débit du côté du petit, ce qui détermine *(fig. 253)* une courbure de la pièce dans le sens du petit cylindre, qui est de préférence disposé au-dessous du grand, afin de faciliter la mise en place d'un guide qui redresse la pièce à sa sortie.

Les réactions P et P_1 tendent à s'égaliser, parce que si P est plus grand que P_1, la pièce fléchit du côté de l'entrée, l'arc de contact AB diminue, l'arc A_1B_1 augmente de telle sorte que les forces P ou P_1 égales ou inégales, mais d'inclinaison différente sur l'horizontale, donnent une résultante 2P′ oblique à l'axe de la pièce. Celle-ci, fléchie sous l'action

Fig 253

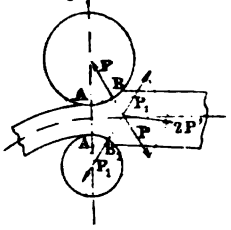


Fig 254

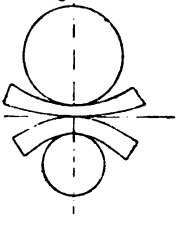
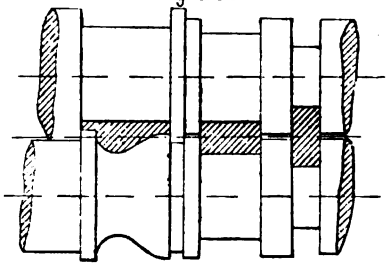


Fig 255



oblique de 2P′, conserve à la sortie sa courbure d'entrée qui s'ajoute à la courbure due au débit inégal.

Ajoutons que la pression des cylindres ayant pour effet de fléchir la pièce symétriquement dans le cas de diamètres égaux, la pièce reste droite; mais il se produit avec deux diamètres inégaux une flexion différente plus accusée vers le petit cylindre que vers le grand, ce qui se vérifie aisément avec deux pièces superposées de même épaisseur que l'on presse entre deux cylindres *(fig. 254)*.

Dans les cylindres à cannelures, le métal remplissant entièrement le vide, il se produit des pressions latérales considérables sur les parois ou joues des cannelures qui moulent la pièce.

Les distances des divers éléments de surface des joues aux axes de rotation étant variables, les vitesses en les divers points le sont aussi. Il se produit, par conséquent, des glissements d'autant plus grands que la vitesse des points considérés est plus grande ou plus petite que la vitesse de la pièce.

Les pressions latérales ne sauraient guère s'évaluer; le travail de glissement, non plus. Afin de réduire ce travail au minimum, on répartit la section de la pièce, on dispose la cannelure de manière que les différences des diamètres soient minima. Ainsi une section rectangulaire doit avoir *(fig. 255)* son plus grand côté parallèle aux axes des cylindres.

Les sections dissymétriques donnent lieu à des réactions dont les résultantes sont dirigées obliquement à l'horizontale; les pièces se courbent dans le plan vertical ou dans une direction oblique à ce plan; on a soin de les redresser et de les diriger convenablement. On peut aussi leur laisser une contre-courbure qui correspond précisément à la courbure que prendrait la pièce droite après refroidissement et du fait de la contraction non uniformément répartie.

Autre méthode de calcul du travail de laminage.

Les relations d'équilibre de laminage peuvent être déduites plus rapidement par les calculs suivants :

Soit p' *(fig. 256)* la pression par unité superficielle sur une tranche de largeur ds et de largeur de pièce b.

La pression sur l'élément bds sera :

$$dP = bdsp'.$$

Mais, si on admet que $\frac{p'}{p_1} = \frac{\sin\theta'}{\sin\theta}$,

soit $p' = \frac{p_1 \sin\theta'}{\sin\theta} = p\sin\theta'$, en posant $p = \frac{p_1}{\sin\theta}$, il vient

$$dP = pbr\sin\theta' d\theta'.$$

La pression totale sur un cylindre sera la somme des dP de 0 à θ, ou

$$P = pbr\int_0^{\theta}\sin\theta' d\theta' = pbr\,(-\cos\theta')_0^{\theta} = pbr\,(1-\cos$$

or $$r(1-\cos\theta) = \frac{a-a'}{2},$$

donc $$P = pb\,\frac{a-a'}{2} = \frac{p_1 b}{\sin\theta}\times\frac{a-a'}{2}.$$

Les pressions des deux cylindres étant toutes symétriques par rapport à l'axe de la pièce donnent lieu à une résultante dirigée suivant cet axe, et dont la valeur sera déduite en projetant les pressions partielles sur l'axe considéré :

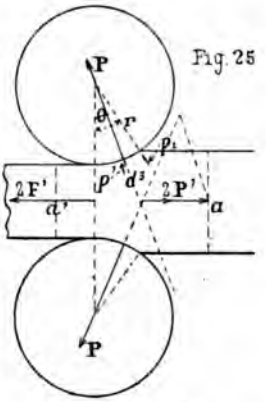


Fig. 25

La pression partielle dP donne une projection :

$$dP\sin\theta' = pbr\sin^2\theta' d\theta'$$

et la somme étendue aux deux cylindres sera :

$$2P' = 2pbr\int_0^{\theta}\sin^2\theta' d\theta' = 2pbr\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}\right)$$

ou $$2P' = \frac{2p_1 br}{\sin\theta}\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}\right).$$

Le travail de laminage à la vitesse v serait :

$$2P'v = \frac{2p_1 brv}{\sin\theta}\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}\right).$$

L'adhérence $2F$ sur les deux cylindres est égale à

$$2Pf = 2F.$$

Les frottements étant symétriques, comme les pressi donnent une résultante dirigée suivant l'axe de la pièce et la valeur est égale à la somme des projections :

$$2F' = 2pbrf\int_0^{\theta}\sin\theta'\cos\theta' d\theta' = 2pbrf\,\frac{\sin^2\theta}{2}.$$

NUMÉROS D'ORDRE de l'essai ou des passes	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	DIMENSIONS SUCCESSIVES				AUGMENTATIONS DES DIMENSIONS				RÉDUCTIONS DES DIMENSIONS			
						des longueurs		des largeurs		des épaisseurs		des sections	
		Longueurs	Largeurs	Épaisseurs	Sections	partielles	totalisées	partielles	totalisées	partielles	totalisées	partielles	totalisées
	N° 1	m	mm	mm									
0	Éprouvette de plomb	1,000	20	20	400	»	»	»	»	»	»	»	»
1	laminée entre des rou-	1,170	21	16,3	342	170	170	1	1	3,7	3,7	58	58
2	leaux de 100mm de diam.	1,430	22,2	12,6	280	260	430	1,2	2,2	3,7	7,4	62	120
3	par réductions succes-	1,890	23,7	8,9	212	460	890	1,5	3,7	3,7	11,1	68	188
4	sives égales à 3mm,7.	3,070	25	5,2	130	1,180	2,070	1,3	5	3,7	14,8	82	270
	N° 2												
0	Éprouvette de plomb	1,000	20	20	400	»	»	»	»	»	»	»	»
1	laminée sous charge	1,125	20,6	17,2	355	125	125	0,6	0,6	2,8	2,8	45	45
2	constante de 460 kilog.	1,290	21,1	14,7	310	165	290	0,5	1,1	2,5	5,3	45	90
3	donnant lieu à une tare	1,482	21,6	12,5	270	192	482	0,5	1,6	2,2	7,5	40	130
4	ou résistance de frotte-	1,690	22	10,7	237	208	690	0,4	2	1,8	9,3	33	163
5	ment de 70 kilog.	1,970	22,5	9	203	280	709	0,5	2,5	1,7	11	34	197
6		2,420	22,9	7,4	166	450	1,420	0,4	2,9	1,6	12,6	37	234
7		2,860	23,4	5,9	140	440	1,860	0,5	3,4	1,5	14,1	26	260
8		3,650	23,8	4,6	110	790	2,650	0,4	3,8	1,3	15,4	30	290
9		4,880	24,1	3,4	82	1,230	3,880	0,3	4,1	1,2	16,6	28	318
	N° 3												
0	Éprouvette de plomb	1,000	20	20	400	»	»	»	»	»	»	»	»
1	laminée entre des rou-	1,070	20,4	18,5	379	0,070	0,070	0,4	0,4	1,5	1,5	21	21
2	leaux de 100mm de dia-	1,120	20,8	17,1	356	0,050	0,120	0,4	0,8	1,4	2,9	23	44
3	mètre par réductions	1,200	21,1	15,8	334	0,080	0,200	0,3	1,1	1,3	4,2	22	66
4	sous une charge cons-	1,290	21,3	14,5	310	0,090	0,290	0,2	1,3	1,3	5,5	24	90
5	tante de 350 kilog. don-	1,382	21,8	13,2	288	0,092	0,382	0,5	1,8	1,3	6,8	22	112
6	nant lieu à une tare	1,520	22	12	264	0,138	0,520	0,2	2	1,2	8,0	24	136
7	de 50 kilog.	1,66	22,3	10,8	242	0,140	0,660	0,3	2,3	1,2	9,2	22	158
8		1,85	22,6	9,6	217	0,190	0,850	0,3	2,6	1,2	10,4	25	183
9		2,07	22,9	8,4	193	0,220	1,070	0,3	2,9	1,2	11,6	24	207
10		2,35	23,2	7,3	170	0,280	1,350	0,3	3,2	1,1	12,7	23	230
11		2,70	23,4	6,3	148	0,350	1,700	0,2	3,4	1	13,7	22	252
12		3,130	23,6	5,4	128	0,430	2,130	0,2	3,6	0,9	14,6	20	272
13		3,700	23,8	4,5	108	0,570	2,700	0,2	3,8	0,9	15,5	20	292
	N° 4												
0	Éprouvette de plomb	1,000	20	20	400	»	»	»	»	»	»	»	»
1	laminée entre des rou-	1,140	21,5	16,3	350	0,140	0,140	1,5	1,5	3,7	3,7	50	50
2	leaux de 167mm de diam.	1,380	23	12,6	290	0,240	0,380	1,5	3	3,7	7,4	60	110
3	par réductions succes-	1,830	24,5	8,9	219	0,450	0,830	1,5	4,5	3,7	11,1	71	181
4	sives égales à 3mm,7.	2,900	26,5	5,2	138	1,070	1,900	2	6,5	3,7	14,8	81	262
5		9,200	29	1,5	43,5	6,300	8,200	3	9,5	3,7	18,5	94,5	356,5
	N° 5												
0	Éprouvette de plomb	1,000	20	20	400	»	»	»	»	»	»	»	»
1	laminée entre des cylin-	1,120	21	17	357	0,120	0,120	1	1	3	3	43	43
2	dres de 167mm de diam.	1,270	21,7	14,5	314	0,150	0,270	0,7	1,7	2,5	5,5	43	86
3	par réductions succes-	1,450	22,3	12,3	276	0,180	0,450	0,6	2,3	2,2	7,7	38	124
4	sives sous charge cons-	1,680	23,1	10,3	239	0,230	0,680	0,8	3,1	2	9,7	37	161
5	tante de 930 kilog. don-	2,060	23,7	8,2	194	0,380	1,060	0,6	3,7	2,1	11,8	45	206
6	nant lieu à une tare	2,480	24,3	6,6	161	0,420	1,480	0,6	4,3	1,6	13,4	33	239

Tableau n° 29.

Allongement de pression	Chemin effectif de l'effort moteur E	Effort moteur F	Effort de laminage proprement dit F_u	Rapports $\frac{F_u}{F}$	TRAVAIL de F		TRAVAIL de F_u		Rapports $\frac{T_u}{T}$	Résistance de laminage rapportée au mm² de section réduite		OBSERVATIONS
					par passage EF	totalisé	par passage EF_u	totalisé		$R = \frac{F}{S'}$	$R_u = \frac{F_u}{S-S'}$	
					kgm							
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	La tare relative aux résistances des frottements n'a pu être mesurée avec exactitude. Les faces latérales sont bombées après chaque passage.
0,060	1,110	250	»	»	278	278	»	»	»	4,3	»	
0,080	1,350	270	»	»	373	651	»	»	»	4,4	»	
0,090	1,800	295	»	»	540	1,191	»	»	»	4,4	»	
0,150	2,920	330	»	»	965	2,156	»	»	»	4	»	
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	L'allongement de pression était moyennement de 4,5 0/0. Dans cet essai les faces latérales restent sensiblement planes. (Nous n'avons pas tenu compte de la tare relative aux frottements développés par les pressions dues aux tractions ou efforts moteurs qui se composant avec les pressions proprement dites donnent lieu à des résultantes d'ailleurs peu différentes des forces considérées).
0,045	1,080	180	110	0,61	194	194	119	119	0,615	4	2,45	
0,050	1,240	175	105	0,60	216	410	130	249	0,610	3,9	2,3	
0,062	1,420	170	100	0,59	242	652	142	391	0,6	4,2	2,5	
0,070	1,620	164	94	0,57	265	917	153	544	0,595	4,9	2,8	
0,080	1,890	158	88	0,56	300	1,217	167	711	0,588	4,6	2,6	
0,100	2,320	152	82	0,54	352	1,569	190	901	0,575	4,2	2,2	
0,120	2,740	144	74	0,52	395	1,964	203	1,104	0,565	5,5	2,8	
0,150	3,500	138	68	0,49	478	2,442	238	1,342	0,550	4,6	2,2	
0,190	4,690	130	60	0,46	610	3,052	281	1,623	0,530	4,6	2,1	
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	Dans cet essai les faces latérales prennent une forme creuse.
0,040	1,030	120	70	0,58	124	124	72	72	0,580	5,7	3,3	
0,044	1,076	120	70	0,58	128	242	75	147	0,610	5,2	3	
0,048	1,152	120	70	0,58	138	380	81	228	0,600	5,4	3,2	
0,050	1,240	118	68	0,57	147	527	84	312	0,595	4,9	2,8	
0,056	1,328	118	68	0,57	157	684	91	403	0,590	5,3	3,1	
0,060	1,460	116	66	0,56	170	854	96	499	0,585	4,8	2,7	
0,065	1,595	115	65	0,56	183	1,037	99	598	0,570	5,2	2,8	
0,080	1,770	112	62	0,55	198	1,235	106	704	0,575	4,5	2,4	
0,085	1,995	110	60	0,54	219	1,454	116	820	0,570	4,6	2,4	
0,090	2,280	108	58	0,53	247	1,701	128	948	0,550	4,7	2,4	
0,100	2,600	105	55	0,52	274	1,975	135	1,083	0,550	4,8	2,4	
0,120	3,010	102	52	0,51	306	2,281	150	1,233	0,540	5,1	2,5	
0,150	3,550	100	50	0,50	356	2,636	177	1,410	0,535	5	2,5	
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	L'allongement de pression a été en moy. de 5 0/0. Les efforts F ont été rapportés au rayon $\frac{167}{2}$ par l'égalité des moments de rotation $Mr = Fr$ $= F'r'$ soit $F = F'\frac{r'}{r} = F' \times \frac{50}{83,5} = 0,6F'$ F' est l'effort tangentiel mesuré sur les cylindres de 100mm de diamètre.
0,570	1,683	265	»	»	287	287	»	»	»	5,3	»	
0,068	1,811	305	»	»	400	687	»	»	»	4,8	»	
0,092	1,738	340	»	»	590	1,277	»	»	»	4,7	»	
0,145	2,755	390	»	»	1,080	2,357	»	»	»	4,8	»	
0,460	8,740	450	»	»	3,940	6,297	»	»	»	4,7	»	
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	L'essai analogue avec les cylindres de 100mm de diam. n'a pu se faire dans de bonnes conditions. Sous la pression de 930 kg. les cylindres de 100mm écrasaient le plomb d'une façon
0,040	1,080	230	158	0,68	249	249	171	171	0,680	5,3	3,7	
0,050	1,120	225	153	0,68	252	501	171	342	0,680	5,2	3,6	
0,056	1,304	215	143	0,67	281	782	186	528	0,670	5,6	3,7	
0,075	1,605	210	138	0,66	337	1,119	222	750	0,670	5,7	3,7	
0,090	1,970	200	128	0,64	393	1,512	253	1,003	0,660	4,4	2,9	
0,110	2,370	190	118	0,62	450	1,962	280	1,283	0,650	5,7	3,5	

NUMÉROS D'ORDRE de l'essai ou des passages	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	DIMENSIONS SUCCESSIVES				AUGMENTATIONS DES DIMENSIONS				RÉDUCTIONS DES DIMENSIONS			
						des longueurs		des largeurs		des épaisseurs		des sections	
		Longueurs	Largeurs	Épaisseurs	Sections	partielles	totalisées	partielles	totalisées	partielles	totalisées	partielles	totalisées
7	de 72 kilog. rapportée	3,130	25	5,2	128	0,650	2,130	0,7	5	1,4	14,8	33	272
8	au rayon $\frac{167}{2} = 83,5$.	4,000	25,5	3,9	100	0,870	3,000	0,5	5,5	1,3	16,1	28	300
9		5,480	26	2,8	73	1,480	4,480	0,5	6	1,1	17,2	27	327
10		7,900	26,5	1,9	50,5	2,420	6,900	0,5	6,5	0,9	18,1	22,5	349,5
11		12,410	26,9	1,2	32,2	4,520	11,420	0,4	6,9	0,7	18,8	18,3	537,8
12		16,300	27,2	0,9	24,5	3,880	15,300	0,3	7,2	0,3	19,1	7,7	545,5
13		24,200	27,4	0,6	16,5	7,900	23,200	0,2	7,4	0,3	19,4	8	553,5
14		36,400	27,6	0,4	11	12,200	35,400	0,2	7,6	0,2	19,6	5,5	559
15		48,000	27,7	0,3	8,3	11,600	47,000	0,1	7,7	0,1	19,7	2,7	561,7
16		72,000	27,8	0,2	5,56	24,000	71,000	0,1	7,8	0,1	19,8	2,74	564,44
17		143,000	27,9	0,1	2,8	71,000	141,000	0,1	7,9	0,1	19,9	2,76	567,20
18		286,000	28	0,05	1,4	133,000	285,000	0,1	8	0,05	19,95	1,4	568,60
	N° 6												
0	Éprouvette de plomb	1,000	20	20	400	»	»	»	»	»	»	»	»
1	laminée entre deux cy-	1,032	20,2	19,1	386	0,032	0,032	0,2	0,2	0,9	0,9	14	14
2	lindres de 167mm de diа-	1,080	20,3	18,3	372	0,058	0,090	0,1	0,3	0,8	1,7	14	28
3	mètre par réductions	1,110	20,4	17,6	360	0,030	0,120	0,1	0,4	0,7	2,4	12	40
4	successives sous charge	1,150	20,5	16,9	347	0,040	0,160	0,1	0,5	0,7	3 1	13	53
5	constante de 350 kilog.	1,194	20,6	16,3	335	0,044	0,204	0,1	0,6	0,6	3,7	12	65
6	donnant lieu à une tare	1,230	20,7	15,7	325	0,036	0,240	0,1	0,7	0,6	4,3	10	75
7	de 30 kilog.	1,270	20,8	15,1	315	0,040	0,280	0,1	0,8	0,6	4,9	10	85
8		1,310	20,9	14,6	305	0,040	0,320	0,1	0,9	0,5	5,4	10	95
9		1,350	21	14,1	296	0,040	0,360	0,1	1	0,5	5,9	9	104
10		1,400	21,1	13,6	287	0,050	0,410	0,1	1,1	0,5	6,4	9	113
11		1,440	21,2	13,1	278	0,040	0,450	0,1	1,2	0,5	6,9	9	122
12		1,490	21,3	12,6	269	0,050	0,500	0,1	1,3	0,5	7,4	9	131
13		1,540	21,4	12,1	260	0,050	0,550	0,1	1,4	0,5	7,9	9	140
14		1,590	21,5	11,6	251	0,050	0,600	0,1	1,5	0,5	8,4	9	149
15		1,660	21,6	11,1	242	0,070	0,670	0,1	1,6	0,5	8,9	9	158
16		1,720	21,7	10,7	233	0,060	0,730	0,1	1,7	0,4	9,3	9	157
17		1,780	21,8	10,3	225	0,060	0,790	0,1	1,8	0,4	9,7	8	165
18		1,830	21,9	9,9	218	0,050	0,840	0,1	1,9	0,4	10,1	7	172
19		1,910	22	9,5	210	0,080	0,920	0,1	2	0,4	10,5	8	180
20		2,050	22,1	9,1	202	0,040	0,960	0,1	2,1	0,4	10,9	8	188
21		2,060	22,2	8,7	194	0,010	0,970	0,1	2,2	0,4	11,3	8	196
22		2,150	22,3	8,3	186	0,090	1,060	0,1	2,3	0,4	11,9	8	204
23		2,250	22,4	7,9	178	0,100	1,160	0,1	2,4	0,4	12,1	8	212
24		2,370	22,5	7,5	169	0,120	1,300	0,1	2,5	0,4	12,5	9	221
25		2,490	22,6	7,1	161	0,120	1,400	0,1	2,6	0,4	12,9	8	229
26		2,630	22,7	6,7	152	0,140	1,540	0,1	2,7	0,4	13,3	9	238
27		2,780	22,8	6,3	144	0,150	1,690	0,1	2,8	0,4	13,7	8	246
28		2,940	22,9	5,9	136	0,160	1,850	0,1	2,9	0,4	14,1	8	254
29		3,150	23	5,5	127	0,210	2,060	0,1	3	0,4	14,5	9	263
30		3,380	23,1	5,1	118	0,230	5,290	0,1	3,1	0,4	14,9	9	272
31		3,670	23,2	4,7	109	0,290	2,580	0,1	3,2	0,4	15,3	9	281
32		3,950	23,3	4,3	101	0,280	2,860	0,1	3,3	0,4	15,7	8	289
33		4,350	23,4	3,9	92	0,400	3,260	0,1	3,4	0,4	16,1	9	298
34		4,820	23,5	3,5	83	0,470	3,730	0,1	3,5	0,4	16,5	9	307
35		5,400	23,6	3,1	74	0,580	4,310	0,1	3,6	0,4	16,9	9	316
36		6,04	23,7	2,8	66	0,640	4,950	0,1	3,7	0,3	16,2	8	324
37		6,670	23,8	2,5	60	0,630	5,580	0,1	3,8	0,3	17,5	6	330
38		7,540	23,9	2,2	53	0,870	6,450	0,1	3,9	0,3	17,8	7	337
39		8,890	24	1,9	45	1,350	7,800	0,1	4	0,3	18,1	8	345

Tableau n° 29 *(Suite)*.

Allongement de pression	Chemin effectif de l'effort moteur E	Effort moteur F	Effort de laminage proprement dit F_u	Rapports $\frac{F_u}{F}$	TRAVAIL de F : par passage EF	TRAVAIL de F : totalisé	TRAVAIL de F_u : par passage EF_u	TRAVAIL de F_u : totalisé	Rapports $\frac{T_u}{T}$	Résistance de laminage rapportée au mm² de section réduite : $R = \frac{F}{S-S'}$	Résistance de laminage rapportée au mm² de section réduite : $R_u = \frac{F_u}{S-S'}$	OBSERVATIONS
0,140	2,990	180	108	0,60	538	2.500	323	1,606	0,64	5,4	3,3	continue en marche; on ne pouvait obtenir des réductions uniformes pendant un même passage. Les moyennes de plusieurs essais n'étaient pas acceptables.
0,180	3,820	172	100	0,58	658	3,158	382	1,988	0,63	6,1	3,6	
0.240	5,240	160	88	0,55	840	3,998	454	2,442	0,61	5,9	3,3	
0,350	7,550	148	76	0,51	1,117	5,115	572	3,014	0,60	6,6	3,4	
0,560	11,860	124	52	0,42	1,478	6,593	620	3,634	0,55	6,8	2,9	
0,720	15,580	112	40	0,36	1,740	8,333	624	4,258	0,51	14,6	5,2	
1,100	23,100	104	32	0,31	2,400	10,733	740	4,998	0,47	13	4	
1,600	34,800	94	22	0,24	3,280	14,013	800	5,798	0,41	17,1	4	
2,150	45,850	88	16	0,18	4,050	18,063	734	6,532	0,36	32,5	5,9	
3,250	68,750	84	12	0,14	5,800	23,863	825	7,357	0,31	30,7	4,4	
6.400	136,800	82	10	0,12	11,300	35,163	1,368	8,725	0,25	29,8	3,6	
2,800	273,200	78	6	0,06	27,320	62,483	1,640	10,365	0,16	71	4,3	
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	L'allongement de pression a été en moyenne de 2 0/0.
0,020	1,012	60	30	0,50	60	60	30	30	0,50	4,3	2,1	
0,021	1,060	60	30	»	63	125	32	62	»	»	»	
0,022	1,088	60	30	»	65	188	32	94	»	»	»	
0.023	1,127	60	30	»	68	256	34	128	»	»	»	
0.024	1,170	59	29	»	69	325	34	162	»	»	»	
0,024	1,206	59	29	»	71	396	35	197	»	»	»	
0.025	1,245	59	29	»	73	469	36	233	»	»	»	
0,026	1,284	58	28	0,48	75	544	36	269	0,49	5.8	2.8	
0,027	1,323	58	28	»	77	621	37	306	»	»	»	
0,028	1,372	58	28	»	80	701	37	343	»	»	»	
0,029	1,411	58	28	»	82	783	40	383	»	»	»	
0,030	1,460	58	28	»	85	868	41	424	»	»	»	
0,031	1,509	58	28	»	88	956	42	466	»	»	»	
0,032	1,558	58	28	»	90	1,046	43	509	»	»	»	
0,033	1,627	58	28	»	95	1,141	45	554	»	»	»	
0,034	1,686	56	26	0,46	94	1,235	44	598	0,48	6,2	2,9	
0,035	1,745	56	26	»	98	1,333	45	643	»	»	»	
0,036	1,794	56	26	»	100	1,433	46	689	»	»	»	
0,038	1,872	56	26	»	105	1,538	49	738	»	»	»	
0,040	2,010	56	26	»	112	1,650	52	790	»	»	»	
0,041	2,019	56	26	»	114	1,764	53	843	»	»	»	
0,043	2,107	56	26	»	118	1,882	55	898	»	»	»	
0,045	2,205	56	26	0,46	124	2,006	58	956	0,46	7	3,2	
0,047	2,323	56	26	»	130	2,136	60	1,016	»	»	»	
0,050	2,440	56	26	»	137	2,273	63	1,079	»	»	»	
0,052	2,578	56	26	0,46	144	2,417	67	1,146	0,48	6,2	2,9	
0,055	2,725	56	26	»	152	2,569	71	1,217	»	»	»	
0,058	2,882	56	26	»	162	2,731	75	1,292	»	»	»	
0,063	3,087	56	26	»	174	2,905	80	1,372	»	»	»	
0,067	3,313	56	26	»	186	3,091	86	1,458	»	»	»	
0,073	3,597	56	26	»	200	3,291	93	1,551	»	»	»	
0,079	3,871	56	26	»	217	3,508	100	1,651	»	»	»	
0,087	4,263	56	26	»	240	3,748	111	1,762	»	»	»	
0,096	4,724	56	26	»	260	4,008	123	1,885	»	»	»	
0,108	5,292	50	26	»	296	4,304	138	2,023	»	»	»	
0,120	5,920	54	24	»	320	4,624	142	2,165	»	»	»	
0,133	6,537	52	22	»	340	4,964	144	2,809	»	»	»	
0,151	7,389	52	22	»	313	5,277	162	2,971	»	»	»	
0,180	8,700	52	22	0,42	455	5,732	192	3,163	0,55	6,5	2,7	

La relation d'équilibre voisine de l'entraînement par l'adhérence est :

$$2P' = 2F' \text{ ou } \frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4} = f\frac{\sin^2\theta}{2},$$

d'où

$$f = \frac{\theta - \frac{\sin^2\theta}{2}}{\sin^2\theta}.$$

Ainsi pour $\theta = 30°$ il viendrait :

$$f = \frac{\frac{6,28}{12} - 0,44}{0,25} = \frac{0,062}{0,25} = 0,24.$$

Essais de laminage.

Les essais de laminage à chaud ne pouvant se faire avec suffisamment de précision à cause de la variation rapide de la température, nous avons opéré à froid sur du plomb, métal dont la ductilité, la malléabilité et la résistance se prêtent bien à de tels essais.

Afin de réduire au minimum les erreurs provenant des organes de transmission intermédiaires, nous avons enroulé sur chacun des cylindres un fil de fer dont les deux brins libres étaient attachés à un dynamomètre *(fig. 257)* et étaient tirés au moyen d'un palan dont la corde était enroulée sur un treuil. La traction mesurée par le dynamomètre donnait l'effort moteur appliqué tangentiellement à chaque rouleau. De plus, les deux rouleaux étaient ainsi bien entraînés, sans chocs, et sans glissement relatif.

La pression était produite au moyen de vis reliées, par des engrenages hélicoïdaux, à d'autres montés sur un arbre muni d'une poulie sur laquelle était enroulée la lanière de suspension du poids donnant la pression.

L'opération se faisait à faible vitesse, de manière à ne pas développer de chocs et à laisser agir convenablement le poids dès le commencement du laminage.

La pression due au poids actionnant les vis de serrage était mesurée directement par un dynamomètre relié au rouleau supérieur mobile.

A chaque poids produisant la pression correspondait un effort moteur estimant la tare due aux divers frottements des organes du laminoir. Cet effort se mesurait également par le dynamomètre relié au fil de traction motrice et constituait la tare relative au poids employé, tare que nous avons retranchée dans la plupart des essais, afin de faire ressortir la part d'énergie du laminage proprement dit, et celle des frottements.

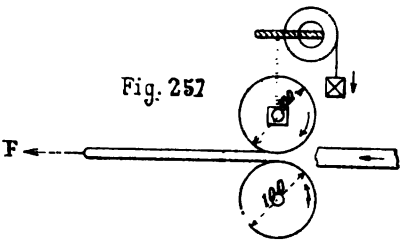


Fig. 257

Dans ces conditions, nous sommes arrivé à déterminer les divers éléments du laminage d'éprouvettes simples avec une approximation qui permet de faire ressortir les meilleures règles à suivre, soit en vue de la rapidité du travail, soit au point de vue du rendement en énergie mécanique.

Essais de laminage entre des cylindres de 100^{mm} de diamètre par réductions successives égales à 3^{mm},7 sur des éprouvettes de plomb de section $= \frac{20}{20}$.

Dans ces essais, nous n'avons pas produit la pression au moyen d'un poids connu; nous avons simplement, à chaque passage, repéré le cylindre mobile de manière à produire des réductions d'épaisseur successives égales à 3^{mm},7. Le tableau n° 29 (essai n° 1) donne les éléments mesurés et calculés.

L'épure *(fig. 1, pl. XXXII)* indique les lois des variations des dimensions, des efforts et des énergies.

La droite A des variations d'épaisseur a été rapportée en prenant pour abscisses des longueurs égales représentant les passages. Les autres courbes sont rapportées en ayant pour abscisses les réductions d'épaisseur. La courbe F des tractions ou efforts montre que ces efforts croissent avec la réduction de l'épaisseur; l'effort final correspondant à la réduction à zéro atteindrait une valeur qui dépendrait de l'épaisseur finale à réduire dans le dernier passage. En considérant les formules de laminage établies ci-avant, on peut admettre que les rapports des valeurs de F sont égaux aux rapports des valeurs des pressions moyennes p qui s'exercent sur les cylindres.

Les variations des largeurs donnent la courbe L qui est sensiblement une droite dans les limites de l'essai; mais nous verrons plus loin que la largeur finale tend vers une certaine limite (28^{mm}) lorsque l'épaisseur tend vers zéro. L'accroissement de largeur par passage est moyennement de $1^{mm},2$, soit environ 0,06 de la largeur. La pression étant forte, les faces latérales de l'éprouvette se renflaient. Les longueurs successives d'une éprouvette de 1^{m}, de longueur primitive, donnent la courbe B qui a pour asymptote l'ordonnée d'abscisse égale à 20; cette courbe présente une allure hyperbolique.

La variation des réductions de section est représentée par la courbe S qui tend vers la valeur 400 à l'ordonnée d'abscisse 20. Cette courbe affecte la forme parabolique.

Dans cet essai, l'allongement dû à la pression, mesuré par des repères gravés sur les cylindres, était compris entre 4 et 5 0/0; nous l'avons retranché des longueurs de l'éprouvette pour estimer le travail effectif de l'effort moteur, travail dont la variation est représentée par la courbe T.

Cette courbe d'énergie comprend le travail proprement dit de laminage et celui des frottements des outils; elle a pour asymptote l'ordonnée dont l'abscisse est 20; en effet, pour une réduc-

tion qui tend vers zéro, la longueur tend vers l'infini et le travail des frottements n'étant pas nul, l'ordonnée a une valeur infinie.

La résistance moyenne de laminage R, rapportée au millimètre carré de section réduite, accuse une valeur qui s'écarte peu de $4^{kg},4$, montrant que, pour un métal malléable, cette résistance de laminage est sensiblement constante dans les limites des épaisseurs de l'éprouvette laminée.

Nous n'avons pu déterminer avec suffisamment d'exactitude la tare du laminoir pour chacun des passages. Afin de pouvoir tenir compte de cet élément très important, nous avons opéré dans les essais suivants, en donnant une pression constante déterminant des réductions décroissantes. A cause du fil métallique servant à produire la rotation des cylindres, nous n'avons pu pousser la réduction d'épaisseur au-dessous de 3^{mm}.

Essai n° 2. — Dans l'essai n° 2, la pression s'élevait à 480^{kg}, donnant une tare de 70^{kg}; le tableau donne les divers éléments et l'épure *(fig. 2)* permet de bien suivre leurs variations.

Celle des épaisseurs est représentée par la courbe E_2 à ordonnées décroissantes à chaque passage. Il a fallu neuf passages pour la réduction à $3^{mm},4$; la réduction partielle a varié de $2^{mm},8$ au début à $1^{mm},2$ à la fin; l'augmentation de largeur (courbe L_2) est encore sensiblement proportionnelle aux réductions dans les limites de l'essai. Les faces latérales de l'éprouvette sont restées à peu près planes.

On voit que les augmentations de largeur pour des réductions égales sont moins élevées dans cet essai que dans le précédent. Ainsi, pour la réduction d'épaisseur à $3^{mm},2$, l'essai n° 1 accuse une augmentation de largeur égale à 5^{mm}, tandis que dans l'essai n° 2 cette augmentation atteint seulement $3^{mm},5$.

Les fortes réductions sont donc favorables à l'élargissement, déformation qui dépend, en effet, tout particulièrement de l'intensité de la pression.

Les longueurs successives donneraient une courbe analogue

à celle de l'essai n° 1 ; de même les réductions de section accuseraient une courbe peu différente de la courbe S de l'essai n° 1 ; nous n'avons donc pas tracé ces courbes.

La courbe d'énergie T_1 se rapportant au travail total est un peu plus relevée que celle de l'essai précédent, montrant ainsi qu'il est préférable de laminer par fortes réductions plutôt que par faibles réductions. Remarquons cependant que les différences ne sont pas grandes dans les limites des essais, et que, pratiquement, pour des épaisseurs ordinaires, le métal étant malléable, on peut indifféremment opérer par fortes pressions ou par pressions modérées, si on ne tient pas compte de la durée du travail.

Cette règle est analogue à celle trouvée pour le martelage des métaux malléables.

Il n'est pas douteux que pour les métaux résistants et possédant une certaine élasticité, il convient de laminer par de fortes réductions. En déduisant la tare (70^{kg}) de l'effort moteur F, on obtient une valeur assez approchée de l'effort F_u correspondant au travail de laminage proprement dit. Cet effort en diffère de l'importance du frottement déterminé par la traction motrice, mais que nous négligerons ici. On voit que l'effort moteur F_1 décroît et que, pour la réduction à zéro, il doit tendre vers la valeur de la tare.

Le rapport $\frac{F_u}{F}$ varie de 0,61 à 0,46 ; il s'ensuit que le travail utile est plus grand au début qu'à la fin du laminage ; que dans les limites de cet essai, le travail des frottements des tourillons des cylindres est moyennement égal au travail de laminage proprement dit, ainsi que le fait ressortir le rapport $\frac{T_u}{T} = 0{,}53$ se rapportant aux valeurs finales totalisées.

Les résistances de laminage rapportées au millimètre carré de section réduite sont en moyenne et respectivement, pour l'effort total et l'effort utile, $4^{kg},5$ et $2^{kg},5$. La première valeur

diffère peu de celle $4^{kg},4$ trouvée dans le premier essai. On pourrait donc admettre que la résistance du plomb au laminage s'élève moyennement à $4^{kg},5$ par millimètre carré de réduction de section en comprenant l'énergie dépensée par les frottements des outils; que cette résistance est de $2^{kg},5$ pour le laminage proprement dit.

La pression moyenne p sur les cylindres, déduite de la relation $p = \frac{P}{b\sqrt{r(a-a')}}$, serait, au début de l'opération,

$$p = \frac{480}{20,6\sqrt{50 \times 2,8}} = 2^{kg};$$

à la fin de l'opération

$$p = \frac{480}{24,1\sqrt{50 \times 1,2}} = 2^{kg},5.$$

En considérant une éprouvette de plomb de 20^{mm} de diamètre et de 20^{mm} de hauteur comprimée entre des plans parallèles, la résistance est respectivement, pour des réductions de même valeur, $1^{kg},4$ et 11^{kg}. La progression de la résistance est donc beaucoup moins rapide dans le laminage que dans le pressage.

Essai n° 3. — Dans l'essai n° 3, on retrouve la même analogie que dans les essais n°s 1 et 2. Les pressions étant plus faibles, les faces latérales se creusent, rendant difficile la mesure exacte de la largeur moyenne.

La décroissance de l'effort F est moins forte que dans l'essai n° 2.

Les courbes d'énergie T et T_u sont plus relevées que dans les essais n°s 1 et 2. L'épure *(fig. 2)* permet de juger les allures respectives de ces courbes dans les trois essais.

Le coefficient de résistance par millimètre carré de section réduite s'élève en restant voisin de 5^{kg} avec frottements, ou de $2^{kg},8$ sans tenir compte des frottements.

La pression moyenne p conserve une valeur voisine de 2^{kg}.

Essais comparatifs avec des cylindres de diamètres différents.

Sur les cylindres de 100^{mm} de diamètre, nous avons monté des bagues de 167^{mm} de diamètre et nous avons de nouveau laminé des éprouvettes des 20 × 20 par réductions égales à 3^{mm},7; puis avec des pressions de 930^{kg} et de 350^{kg}, de manière à pouvoir comparer les résultats avec ceux des essais n°s 1 et 3.

Essai n° 4. — Cet essai comporte les réductions égales à 3^{mm},7. Sur l'épure *(fig. 3)* sont rapportés les principaux éléments qui permettent de facilement comparer les essais n°s 1 et 4.

On voit que les largeurs sont plus grandes avec les gros cylindres qu'avec les petits; les pressions plus fortes élargissant davantage l'éprouvette, la courbure moins prononcée étant moins favorable à l'étirage.

Ainsi, pour la réduction à l'épaisseur 5^{mm},2, la longueur 1^{m} est devenue 3^{m},090 avec les petits cylindres, tandis qu'elle n'atteint que 2^{m},900 avec les gros cylindres.

Les rapports des énergies pour les différentes réductions restent à peu près constants et égaux à 1,1.

Les rapports des énergies partielles sont

$$\frac{287}{278} = \frac{400}{373} = \frac{590}{540} = \frac{1.080}{963} = \frac{3.820}{0} = 1{,}1.$$

Il y a donc peu de différence entre les énergies dépensées avec les gros ou les petits cylindres quand on opère par réductions égales, c'est-à-dire par un même nombre de passages, la vitesse de laminage étant la même.

Essais n°s 5 et 6. — La *figure 4* se rapporte aux essais n°s 5 et 6. Nous avons, pour l'essai n° 5, poussé les réductions jusqu'à 0^{mm},1, mais les mesures deviennent très difficiles à estimer exactement. Il convient de comparer les éléments jusqu'à une réduction à environ 1^{mm} d'épaisseur. Le nombre de passages pour obtenir une même réduction finale est, avec les mêmes

cylindres, à peu près inversement proportionnel aux pressions; mais avec des cylindres différents et des pressions égales, le nombre de passages augmente assez rapidement avec le diamètre.

Ainsi, pour une réduction à $15^{mm},5$, il faut :

Avec les cylindres de 100^{mm} :	pressions	480^{kg}	350^{kg}
	Passages.	8	13
Avec les cylindres de 167^{mm} :	pressions	930^{kg}	350^{kg}
	Passages.	8	31

Les essais n°s 5 et 6 montrent également que les largeurs sont plus grandes sous les fortes pressions que sous les plus faibles; les courbes L se relèvent sensiblement.

Avec la pression de 930^{kg} à la réduction $18^{mm},1$ d'épaisseur, l'augmentation de la largeur est de $6^{m.m},5$, tandis qu'avec la pression 350^{kg}, elle est de 4^{mm}.

Les augmentations partielles décroissent avec les épaisseurs ainsi que l'indiquent les chiffres du tableau.

Pour la pression 930^{kg}, l'augmentation due au premier passage est de 1^{mm}; au quinzième passage, épaisseur $0^{mm},3$, elle n'est plus que $0^{mm},1$.

L'épure *(fig. 4)* indique la courbe S des variations de la section sous les pressions de 930^{kg}; courbe régulière coupant l'axe des abscisses au point 20.

Nous avons aussi tracé les courbes F des efforts et celle $\frac{F_u}{F}$ pour les pressions de 930^{kg}. Toutes ces courbes ont des allures assez semblables; elles aboutissent aux ordonnées de valeurs égales aux tares 72^{kg} et 30^{kg} d'abscisse commune 20.

Les courbes A des réductions d'épaisseur sont régulières, particulièrement pour la courbe des pressions égales à 930^{kg}, donnant des réductions plus faciles à mesurer, et avec une exactitude relative plus grande que celles dues à la pression 350^{kg}, surtout lorsque l'épaisseur de l'éprouvette est inférieure à 2^{mm}.

Il s'ensuit que, dans ces essais, les valeurs obtenues pour les réductions au-dessous de 2^{mm} peuvent plus ou moins s'écarter de la réalité, bien qu'elles soient des moyennes de deux ou trois essais.

Les résultats les plus intéressants des essais qui précèdent sont ceux relatifs à l'énergie dépensée, qui donne lieu aux courbes T du travail totalisé et aux courbes T_u du travail utile.

Dans les périodes des réductions d'épaisseur jusqu'à 18^{mm}, soit une épaisseur finale d'éprouvette de 2^{mm}, l'avantage des fortes pressions est relativement grand.

Ainsi pour les pressions. . .		930^{kg}	350^{kg}
l'énergie totale dépensée est	$T =$	5.115^{kgm}	5.732^{kgm}
l'énergie de laminage est .	$T_u =$	3.014^{kgm}	3.163^{kgm}
les rapports	$\frac{T_u}{T} =$	0,60	0,55

Il faut particulièrement remarquer la variation du rapport $\frac{T_u}{T}$ qui accuse dans l'essai n° 5 une valeur de début égale à 0,68 et une valeur finale égale à 0,16, montrant bien le faible rendement du laminage lorsque les épaisseurs de plomb sont inférieures à $0^{mm},5$.

En moyenne, le rapport $\frac{T_u}{T}$ est voisin de 0,50, c'est-à-dire que le travail des frottements des quatre tourillons des cylindres est sensiblement égal à l'énergie nécessaire au laminage proprement dit du métal malléable.

Nous avons vu que ce rapport $\frac{T_u}{T}$ dans les cylindres de 100^{mm} variait à peu près dans les mêmes limites en restant, cependant, un peu plus élevé; de sorte que le coefficient de rendement serait, en somme, peu différent avec des petits ou avec des gros cylindres.

Mais il existe une différence assez sensible dans la dépense

d'énergie pour des réductions à une même épaisseur, et la comparaison des résultats est instructive particulièrement entre les limites de nos essais avec les cylindres de 100^{mm}, soit entre l'épaisseur initiale 20^{mm} et l'épaisseur 4^{mm} correspondant à une réduction de 16^{mm}. L'épure *(fig. 5)* montre que les écarts au début du laminage sont peu prononcés pour quelques-unes des courbes d'énergie.

On voit nettement que le laminage le plus défavorable est celui avec les gros cylindres et les faibles pressions.

Si on compare les ordonnées des deux courbes correspondant aux pressions de 350^{kg}, les cylindres ayant 167^{mm} et 100^{mm} de diamètre, on voit que, pour une réduction totale de 15^{mm},5 de l'épaisseur, les premiers exigent une énergie de 3.500^{kgm}, tandis que les seconds n'absorbent que 2.636^{kgm}, soit un rapport

$$\frac{3500}{2636} = 1{,}3.$$

Pour 10^{mm},5 ce rapport $= \frac{1538}{1235} = 1{,}25.$

Pour 5^{mm},5 ce rapport $= \frac{560}{527} = 1{,}06.$

Le rapport augmente donc avec la somme des réductions et c'est pourquoi il est particulièrement avantageux d'employer des diamètres réduits pour l'étirage prononcé, et de donner les pressions maxima que les cylindres peuvent supporter avec sécurité.

C'est la règle suivie par la bonne pratique.

L'épure montre bien que l'avantage le plus marqué revient aux cylindres de 100^{mm} produisant des réductions égales à 3^{mm},7, et accusant pour une même épaisseur réduite à 5^{mm},2, les nombres suivants :

Cylindres de 167^{mm} 2357^{kgm},
Cylindres de 100^{mm} 2156^{kgm}.

Rapport $$\frac{2357}{2156} = 1{,}12.$$

Les dernières colonnes des tableaux font ressortir la résistance de laminage rapportée au millimètre carré de section réduite. On peut constater que si avec les cylindres de 100^{mm} de diamètre les valeurs, pour des réductions totales de l'éprouvette jusqu'à 4 à 5^{mm} d'épaisseur, sont voisines de 4^{kg},5 à 5^{kg} moyennement, ces valeurs s'élèvent entre 6 et 7^{kg} avec les cylindres de 167^{mm} de diamètre. La pression moyenne p sur les cylindres prend les valeurs suivantes : au début, réduction de 3^{mm} sous charge de 930^{kg}

$$p = \frac{930}{21\sqrt{83{,}5 \times 3}} = 2^{kg},8;$$

à la réduction de 2^{mm} du quatrième passage

$$p = \frac{930}{23{,}7\sqrt{83{,}5 \times 2}} = 2^{kg},8;$$

au dixième passage

$$p = \frac{930}{26{,}5\sqrt{83{,}5 \times 0{,}9}} = 4^{kg};$$

au quinzième passage

$$p = \frac{930}{27{,}7\sqrt{83{,}5 \times 0{,}1}} = 11^{kg},6.$$

Ces valeurs sont plus élevées que celles obtenues précédemment avec les cylindres de 100^{mm} et montrent que les pressions moyennes augmentent avec les diamètres.

On voit aussi que, pour des épaisseurs inférieures à 1^{mm}, le coefficient de résistance totale, compris les frottements, atteint 20, 40^{kg} et plus encore, alors que celui relatif au laminage proprement dit varie peu et se trouve compris entre 2 et 5^{kg}.

Cela se conçoit aisément, attendu que le travail de frottement est une constante égale à la tare; comme les réductions de section sont peu élevées sous faibles épaisseurs, il s'ensuit que

$\frac{F}{S - S'}$ est grand et croît rapidement dès que l'épaisseu
inférieure à 1^{mm}.

Afin de ne pas surcharger les épures, nous n'avons pas
qué les courbes des variations de ce coefficient ni les cou
d'autres éléments présentant néanmoins un certain intérêt

II. — Laminage transversal ou roulage.

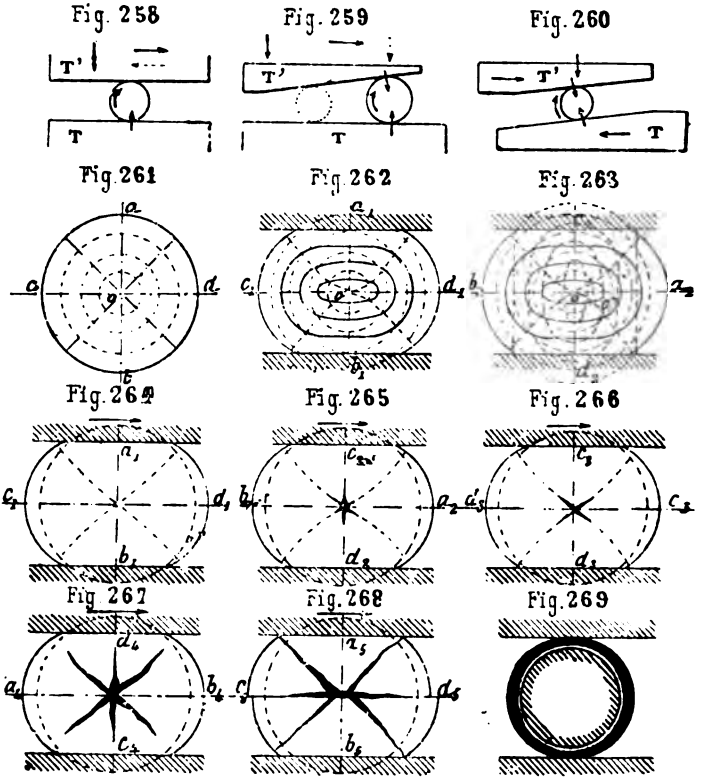
Une pression transversale combinée avec un déplace
rectiligne ou circulaire des outils à direction perpendiculair
un peu oblique à celle de l'effort, et qui produit le mouve
de roulement de la pièce, constitue le procédé de roulage

Ce procédé permet de donner aux pièces des formes de
lution ou autres à surfaces lisses ou modelées suivan
empreintes que présentent les outils. Ceux-ci sont des pla
animés d'un mouvement rectiligne alternatif, ou ce son
rouleaux possédant un mouvement de rotation contin
alternatif.

Dans le cas d'une pièce cylindrique, la masse de mé
façonner peut être placée sur une table horizontale T *(fig.*
et être pressée par un plateau T' à face plane également, a
d'un mouvement rectiligne alternatif et d'un déplace
vertical qui produit, par la pression, la diminution de diam
de la pièce et, par suite, son allongement. Ou encore, le
teau T' est à face inclinée *(fig. 259)*, qui détermine la rédu
de diamètre et donne lieu à des réactions obliques facilit
roulement de la pièce, qui est entraînée par l'action du fl
ment.

La table T peut aussi être animée d'un mouvement rectil
l'opération se faisant ainsi plus rapidement *(fig. 260)*. Le
étant pressé transversalement, il se développe des pres
intérieures longitudinales qui font allonger la masse à m

que les sections transversales se réduisent. Si ces dernières sont variables, la réduction doit se faire progressivement dans le sens transversal et dans le sens longitudinal, sinon, il se produit des torsions ou des glissements intenses, des frottements qui s'opposent à l'écoulement du métal dans le sens longitudinal,



des fissures ou cassures suivant des plans rayonnants et dont l'origine part du centre. De fortes réductions ne sont possibles qu'avec un métal très ductile, pouvant subir dans ses éléments centraux de nombreux raccourcissements et allongements transversaux supérieurs à la limite d'élasticité.

La production des fissures rayonnantes dans les pièces roulées s'explique aisément, lorsqu'on observe les déformations d'un cylindre de métal peu ductile soumis à des pressions assez fortes pour déterminer une section ovalisée, telle que celle *(fig. 262)* sur laquelle est projetée la face de l'about lignée par des circonférences concentriques et des rayons *(fig. 261)*. Par la pression, ces lignes se transforment comme l'indique la *figure 262*.

Par la variation du rayon de courbure des circonférences déformées, on reconnaît facilement les éléments allongés ou tractionnés, les éléments raccourcis ou comprimés et ceux qui ont conservé leur longueur primitive soit dans le sens du rayon, soit dans le sens circulaire. Après une rotation de un quart de tour due au roulage, pendant laquelle la figure est supposée restée à très peu près identique à elle-même, les diamètres ab et cd passant par $a_1b_1 < d$ et $c_1d_1 > d$, sont devenus $a_2b_2 > d > a_1b_1$ et $c_2d_2 < d < c_1d_1$ *(fig. 263)*.

Les éléments comprimés primitivement sont pour la plupart devenus les éléments tractionnés et réciproquement. Un rayon tel que oa a passé par tous les degrés de longueur compris entre oa et oa_1, puis entre oa_1 et oa_2. Le rayon de courbure d'un élément circulaire de pourtour a pris toutes les valeurs comprises entre oa, ∞, et $o'a_2$. Les raccourcissements et les allongements relatifs étant beaucoup plus prononcés vers le centre que vers le pourtour, il s'ensuit que la rupture tend à se produire du centre vers le pourtour. Dans le cas considéré, l'allongement vers le centre prend des valeurs de 100, 200 0/0, tandis que vers le pourtour les allongements sont de 50 0/0. De plus, les éléments dirigés suivant le rayon et ceux dirigés dans le sens circulaire dévient angulairement à chaque instant; les déviations étant relativement prononcées, la rupture se produit le plus souvent sous forme de prismes de glissement.

Si on considère que tous ces phénomènes, plus complexes que nous l'indiquons ici, se répètent plusieurs fois dans un tour de la pièce, on conçoit qu'un métal à faible ductilité ou

même à grande ductilité ne puisse résister pour peu que le roulage soit accusé. (On n'ignore pas qu'aucun métal ne résiste à de multiples tractions et compressions alternatives d'intensité supérieure à la limite d'élasticité.)

Généralement, les premiers prismes de rupture correspondent à ceux qui tendent à se produire dès la déformation initiale *(fig. 264)*.

Le premier diamètre *ab*, raccourci le plus, devient après un quart de tour a_1b_1 *(fig. 265)*; le grand allongement relatif qu'il a subi détermine la rupture au centre, et celle des éléments voisins. Cette première fissure se resserre au quart de tour suivant *(fig. 266)*, et il se manifeste les fissures des sommets des prismes de rupture. Le quart de tour qui suit produit l'agrandissement des trois fissures diamétrales *(fig. 267)* et dans le dernier quart, nous avons supposé *(fig. 268)* que les prismes avaient glissé.

Il va sans dire que, selon la nature du métal et l'importance de la déformation générale, il faut un nombre de tours de roulage plus ou moins grand pour amener la rupture complète, et celle-ci présente de nombreuses variations que nous ne pouvons analyser ici, malgré tout l'intérêt de la question.

Il nous faut simplement retenir que le roulage prononcé ne saurait s'appliquer qu'avec un métal exceptionnel, très homogène, très ductile, conservant autant que possible l'isotropie pendant le travail.

Un métal fibreux ne pourrait supporter les actions transversales de glissement, de traction, de compression que comporte ce procédé. Il convient de ne pas perdre de vue que même l'acier doux très ductile, qui présente au rouge cerise, dans un essai de traction, un coefficient de ductilité de 90 0/0, ne peut subir qu'un petit nombre de tractions et de compressions alternatives prononcées, et qu'il faut le ménager lorsqu'on le lamine par roulage.

Nous ajouterons que le roulage d'une pièce en métal ductile

a pour effet, dans certains cas, de développer au cœur, suivant l'axe, un vide provenant d'une première rupture telle que celle *figure 265*. La longueur de la pièce influe sur la rupture : si la zone d'action des outils est de faible longueur, le déplacement longitudinal se fait aisément, tandis que si la longueur est grande, le frottement s'oppose à l'allongement avec plus d'intensité et les déplacements transversaux prenant une importance relative plus grande, la pièce tend à se rompre au centre plus rapidement.

Le roulage produit aussi des roulures ou fissures circulaires lorsque *(fig. 263)* les zones annulaires dont on peut concevoir la pièce formée présentent des défauts d'homogénéité. La séparation a lieu au passage sur le diamètre horizontal b_2a_2, soit lorsque les rayons de courbure passent par leurs valeurs minima. Les flexions successives de l'élément présentant une solution de continuité, ne tardent pas à agrandir la fissure qui se manifeste extérieurement par une légère boursouflure.

C'est ainsi qu'une douille ou manchette emmanchée à force sur un noyau central, étant roulée entre deux plateaux *(fig. 269)*, ne tarde pas à devenir libre. Parfois même, les pièces se déplacent longitudinalement, la douille tend à se séparer complètement du noyau par les actions obliques qui se produisent.

Le procédé de roulage ordinaire entre deux plateaux peut donc avantageusement s'appliquer au déboîtement des tuyaux étirés sur mandrin, lorsque le tuyau emboîte le mandrin sur toute sa longueur. Ce mandrin peut, d'ailleurs, être considéré comme un outil, le tuyau étant supposé roulé en deux endroits diamétralement opposés, entre deux plateaux et un rouleau central. La paroi du tube s'allonge alors par laminage circulaire.

On constate que le roulage détermine un déplacement relativement grand des molécules dans le sens transversal, dans le sens du mouvement, déplacement dû à la pression et aussi à l'adhérence des outils sur la pièce.

L'écoulement du métal prenant une grande valeur dans le

sens perpendiculaire à la direction du travail utile ou d'étirage, le rendement mécanique du roulage doit être moins élevé que celui du laminage ordinaire.

Le travail mécanique pour le cas simple d'un cylindre de diamètre d réduit à un diamètre d' et passant d'une longueur l à la longueur l', peut être déduit en considérant :

1° L'énergie dépensée par la pression variable P parcourant un chemin égal à d-d'.

2° La résistance P′ au roulement des plateaux et de la pièce donne lieu à une dépense d'énergie dont l'autre facteur est le chemin parcouru par cette résistance.

3° Et il faudrait ajouter le travail de glissement des plateaux ou de roulement sur leurs guides.

On pourrait rapporter l'énergie dépensée à l'unité de volume de métal déplacé dans le sens longitudinal et déterminer les coefficients de résistance et d'énergie relatifs au roulage. (Cela exige des essais qui seraient, sans nul doute, intéressants, mais que nous n'avons pu faire.)

Le procédé de roulage, mis en application vers 1860 par M. Émile Martin (1), à qui est attribué ce mode de travail, avait particulièrement en vue la fabrication des essieux, des pièces simples n'exigeant pas des plateaux d'une construction difficile, la forme pouvant être donnée en une passe ou en plusieurs.

La machine de M. Martin comprenait *(fig. 1, planche XXXIII)* deux tables animées de mouvements rectilignes alternatifs en sens inverse, commandées par engrenages et crémaillères. La table supérieure recevait la pression des vis. Les plateaux, convenablement guidés, roulaient sur des galets afin de réduire les résistances de déplacement ; ils avaient des surfaces obliques de manière à réduire rapidement le diamètre de la pièce, pour un faible déplacement vertical.

On conçoit aussi que des plateaux inclinés transversalement

(1) M. Émile Martin fit breveter en 1861 une machine à rouler les essieux (*Machines-outils*, par J. Chrétien, 1866.)

avec surfaces qui correspondent au développement d'un cône obtenu progressivement, produiraient cette forme, la pièce roulant angulairement ou non. Les plateaux pour pièces de révolution à profil varié sont difficiles à établir, mais pour des pièces simples à achever, la machine à rouler donne une fabrication rapide et précise qui peut motiver son emploi.

Néanmoins, peu d'objets furent fabriqués avec ce genre de machine, jusqu'à ce que l'Américain Simonds (1885) (1) construisît celle représentée *(fig. 2, 3* et *4)* et en tira parti d'une façon remarquable.

Cette machine comprend des matrices ou plateaux fonctionnant par paires et qui portent des surfaces à formes s'élevant sur le plan normal de chaque matrice, ainsi que des surfaces de réduction et d'élargissement situées en diagonales par rapport à la ligne de mouvement, et occupant une position oblique par rapport au plan de chaque matrice. Ces surfaces d'élargissement sont caractérisées par les irrégularités de forme qu'elles présentent et qui obligent la pièce à tourner, à rouler.

Le plateau inférieur B s'assemble dans le bâti de la machine; le deuxième est monté sur un chariot E qui peut se déplacer verticalement et recevoir la pression de la vis D′ qui règle sa position. Le mouvement rectiligne alternatif des plateaux est obtenu par crémaillères, roues d'engrenages et courroie de commande qui se déplace automatiquement à chaque fin de course, celle-ci réglée à volonté suivant la longueur des matrices.

Lorsqu'on veut rouler une pièce, le chariot E est soulevé suffisamment pour permettre l'introduction de la masse chauffée à blanc entre les plateaux. Puis on fait descendre le chariot E en lui donnant pression. Le mouvement des plateaux se produisant, ils moulent peu à peu l'objet.

Pour faciliter le déplacement des plateaux, les soutenir et réduire dans une certaine mesure leur frottement, ils s'appuient

(1) Brevet français du 9 juin 1885.

sur des galets montés sur les arbres des pignons des crémaillères, comme le montre la coupe *(fig. 4)*.

Les matrices G *(fig. 5 à 10)* servent pour rouler des essieux de wagons. Elles présentent des surfaces planes *g* parallèles l'une à l'autre; les surfaces de forme sont en saillie sur les précédentes, elles rétrécissent, étendent, élargissent, donnent la forme à la pièce qui est maintenue par les surfaces *g* de manière à empêcher tout mouvement anormal.

Les surfaces de réduction commencent à exercer leur action à l'extrémité 2 et la terminent au point 3.

Dès que le lingot est placé entre les matrices, les surfaces de réduction commencent par réduire le milieu de l'essieu qui se forme en partant par le bout étroit en forme de pointe. Les bords de cette partie saillante sont biseautés suivant les lignes obliques. Ce sont ces plans inclinés que l'on appelle *surfaces de réduction et d'élargissement* et le plan presque horizontal 6-8-*h'* est appelé *surface à forme*. Ces plans rétrécissent ou étendent et forment ensemble la pièce roulée; le métal en excès, déplacé, s'accumule sur les côtés.

Parfois, il est nécessaire de munir ces plans de forme de saillies ou de stries *t*, afin d'empêcher tout glissement de la pièce, la forcer à rouler. Les traces des stries disparaissent ensuite lorsque les faces finisseuses agissent.

De chaque côté de la partie en saillie H, près du point 3, où s'opère le finissage, se trouvent deux nervures J destinées à former les tourillons des essieux.

Dès que l'extension, suivant l'axe de l'essieu, est arrivée à la limite déterminée, les extrémités sont coupées au moyen de deux couteaux I, dont le tranchant est incliné de manière à agir progressivement.

Les *figures 11, 12, 13* et *14* se rapportent aux matrices produisant des sphères (1), la *figure 15* donne des formes coniques.

(1) La confection des billes d'acier pour coussinets de vélocipèdes a pris une telle importance qu'une maison anglaise fabrique 80.000 billes par jour,

Lorsqu'une pièce a subi l'action des surfaces de réduction, certaines parties restant saisies entre les matrices et possédant des vitesses angulaires différentes, la pièce peut être tordue. On remédie à cet inconvénient en découpant certaines portions des surfaces de forme, suivant des petites faces inclinées, de manière à ne mettre la pièce en contact avec la matrice que sur les points où l'action doit se produire au moment voulu. On ne saurait cependant s'opposer à tout glissement entre les outils et la pièce lorsque celle-ci présente des diamètres variables. Ces glissements ont l'avantage de bien lisser les pièces roulées, mais il convient de les limiter autant que possible.

On peut aussi produire des objets de forme polygonale, cannelée, ondulée, ou toute autre forme non circulaire, en section transversale (1) *(fig. 16* et *suivantes)*.

Les plateaux dits estampes ont des surfaces formantes en relief et des surfaces d'extension et de réduction s'étendant diagonalement à la ligne de mouvement de l'estampe, et situées obliquement au plan de celle-ci; au-dessus, ou entre les dites surfaces d'extension et de réduction, la surface formante de l'estampe a des parties élevées et des creux qui correspondent, ou bien, comme on peut l'admettre, qui engrènent avec les reliefs et les creux de l'objet roulé.

Si, par exemple, l'objet à forger est un pignon *(fig. 25)*, la surface formante *(fig. 29)* est une espèce de crémaillère engrenant avec le pignon que l'on débite dans une barre ronde.

Le rapport entre les surfaces d'extension et de réduction est tel que l'ébauche du métal est travaillée d'abord en un point de sa longueur, puis est roulée à la forme voulue en section transversale sur une courte partie de sa longueur; ensuite, à mesure qu'elle continue à rouler, le métal en surplus est étendu

avec des plateaux rouleurs, attaquant la barre en ses divers points de la longueur; une barre sort de la machine transformée en billes.

(1) Brevet du 6 juillet 1889 à M. Simonds.

ou refoulé, suivant l'axe, le long de l'ébauche, allongeant la partie déjà amenée à la forme voulue jusqu'à ce que l'objet soit entièrement achevé.

Les *figures 22*, *23* et *24* montrent l'ébauche à différentes phases du laminage.

L'estampe *figure 33* est disposée pour obtenir une roue hélicoïdale *(fig. 26)*.

L'estampe *figure 28* produit des pièces cannelées analogues.

La *figure 34* montre les estampes au début de l'opération.

La *figure 36* correspond à la phase moyenne et la *figure 35* à l'achèvement de la pièce.

Ces estampes ont la forme *figure 30*.

La *figure 31* se rapporte à des cannelures et saillies disposées obliquement en hélice.

La *figure 32* correspond à l'estampe pour pièces polygonales, telles que celles *figure 27*. De même, les *figures 16* à *20* montrent les phases de laminage de ces pièces.

Le procédé de roulage permet aussi la fabrication des vis en disposant les nervures des estampes de telle sorte que chacune d'elles arrive successivement en contact avec le métal et forme une partie du filet. A chaque demi-tour de la pièce roulée, une nervure, sur chaque estampe, forme une rainure de la vis s'étendant sur la moitié de l'ébauche, lesdites rainures se rejoignant de façon à constituer une spire complète du creux du filet.

La *figure 39* est une estampe pour vis; la *figure 37* est une partie de l'estampe conjuguée, à l'endroit où se fait le filetage.

Les *figures 38* à *40* montrent l'ébauche à trois phases successives du travail après un tour et demi.

La *figure 42* est la vis achevée devant présenter une tête gaufrée K et un petit téton recevant une clé de manœuvre *(fig. 41)*.

Le lingot chauffé prend d'abord la forme *figure 38* dans la première partie des estampes, puis la rainure ou creux du filet commencée en 6 arrive au point 7, puis en 8 *(fig. 41)*.

Les filets formés ne sont pas influencés par les estampes pendant la formation des autres; ils courent sur les estampes et servent de guide à la pièce.

Le degré de perfection du filet de vis achevé dépend de la disposition rationnelle des empreintes des matrices qui doivent agir progressivement pour déplacer le métal.

Les *figures 45* et *46* sont relatives à des estampes pour produire le gaufrage *(fig. 47)*.

Les *figures 50* et *51* correspondent au gaufrage *(fig. 49)*.

La *figure 55* est une estampe pour gaufrer la surface d'une barre hexagonale.

La *figure 52* est une ébauche de tige ou boulon dont la tête est gaufrée suivant des stries s'entrecoupant obliquement à l'axe de la pièce.

Figure 53, poinçon ou outil à poignée gaufrée.

Figure 54, instrument dentaire à poignée gaufrée, suivant des stries rectangulaires, l'une des directions étant parallèle à l'axe de la pièce, et l'autre perpendiculaire à cet axe. L'extrémité recourbée de cette pièce est achevée par une opération ultérieure.

Les estampes *figures 43* à *46* se rapportent à la confection des projectiles à bout de forme conique ou ogivale. Les surfaces actives ont des parties formantes b^4 qui produisent une rainure ou creux dans le projectile près de sa base, et cette rainure est la partie qui doit avoir sa surface ondulée ou gaufrée. Le gaufrage est ultérieur et indépendant de l'action de la partie formante de l'estampe.

Les nervures de la série *c* sur l'une des estampes sont parallèles à la direction du mouvement des outils, mais les nervures *c* sur l'autre estampe sont perpendiculaires à cette direction; les deux séries de nervures produisent ainsi des empreintes rectangulaires entre elles sur la pièce forgée.

Les nervures destinées à produire une pièce gaufrée peuvent d'ailleurs affecter toute forme voulue et faire un angle quel-

conque par rapport à la direction du mouvement des estampes.

Les nervures d'une série peuvent être plus fines ou avoir une forme différente de celle de l'autre série, en vue de faire ainsi varier le dessin du gaufrage, suivant le but à atteindre.

Il faut, dans tous les cas de roulage, guider les outils avec une extrême précision, si l'on veut éviter que les empreintes de l'une des estampes ne soient détruites par l'autre.

Lorsqu'il s'agit de fortes pièces, de matrices lourdes exigeant une grande pression entre les plateaux, la machine est pourvue d'une presse hydraulique *(fig. 56)*. La pièce, si elle est longue, est supportée par des galets facilitant son déplacement.

Afin de réduire le travail moteur, de faciliter le fonctionnement de la machine à rouler, les plateaux sont disposés verticalement *(fig. 1, 2, 3, planche XXXIV)* (1), ce qui, en outre, prévient l'inconvénient des dépôts de battitures entre les estampes.

Les plateaux PP sont ainsi mieux équilibrés. Ils sont encore commandés par des crémaillères C engrenant avec des pignons C' dont les arbres sont en relation par des roues intermédiaires avec les roues hélicoïdales HH actionnées par les vis sans fin VV montées sur le même arbre A de commande, dont les tourillons reposent sur des paliers munis de billes disposées en séries circulaires séparées par des collets.

La commande de l'arbre A se fait par les poulies DD' recevant, l'une une courroie droite, l'autre une courroie croisée. Ces poulies sont folles sur l'arbre A qui porte entre les deux moyeux un manchon d'embrayage dont le jeu est réglé pour assurer le va-et-vient des plateaux, tout en permettant de faire varier à volonté leur course.

Ces plateaux sont guidés avec grande précision, sinon les objets présentent des défectuosités.

Ce type de machine verticale figurait à l'Exposition universelle de Paris 1889. Elle donne des résultats remarquables. Il

(1) Brevets des 2 mai et 21 mai 1889.

suffit de citer qu'elle produit des boulons à raison de cinq par minute, avec une précision telle, que le numéro d'écrou qui s'adapte au premier cent de boulons fabriqué, est également bon pour le dernier cent d'une production allant de 5.000 à 10.000 sans nécessiter aucune retouche aux matrices.

Le procédé de roulage entre plateaux est appliqué au dressage des pièces cylindriques telles que les barres rondes sortant du laminoir, les tubes.

Une rouleuse à dresser peut comporter *(fig. 57, pl. XXXIII)*, une table horizontale fixe T, un plateau P animé d'un mouvement rectiligne alternatif par commande d'un mécanisme à bielle et manivelle.

On place plusieurs pièces entre les plateaux. Le roulage les dresse et les pare.

La pression due au plateau P portant ou non une charge additionnelle variable à volonté doit être inférieure à celle qui produirait l'aplatissement de la section; elle doit cependant être suffisante pour faire fléchir les parties courbes et les redresser.

Les billes sont aussi régularisées au plus près avec la rouleuse, en ayant soin de donner au plateau P, indépendamment du mouvement de va-et-vient, soit un mouvement transversal intermittent, soit un mouvement de rotation intermittent, afin de rouler sur toutes les parties de la sphère.

Les plateaux peuvent être de forme cylindrique, montés sur des arbres verticaux *(fig. 270)* et présenter une ou plusieurs rainures en spirale donnant la forme à la pièce forgée, par rotation des deux disques en sens contraire, ou par rotation de l'un des deux disques dans le sens convenable.

L'un des disques est muni d'une ou plusieurs ouvertures percées au centre ou près du centre, par lesquelles on introduit les pièces brutes ou ébauchées, ou par lesquelles les pièces achevées sortent.

Le trou de passage correspond à l'extrémité de chaque rai-

nure voisine du centre. Lorsque l'alimentation est faite par les bords, on ménage à l'extérieur de chaque rainure *(fig. 271)* un bord plat *c*.

Les disques sont concentriques ou excentriques. Dans le premier cas, ils peuvent tourner en sens contraire, à des vitesses différentes, ou bien l'un d'eux peut tourner et l'autre rester fixe. Il est préférable de disposer les disques excentriquement *(fig. 272)*; dans ce cas, les disques tournent en sens

Fig. 270

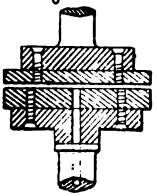


Fig. 271

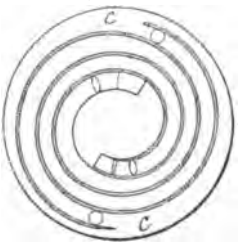


Fig. 272

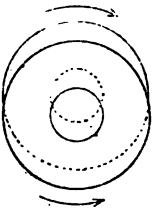


Fig. 273

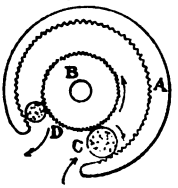


Fig. 274

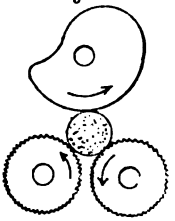
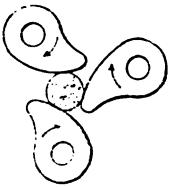


Fig. 275



contraire, avec des vitesses égales ou inégales, de manière à déterminer des glissements favorables au polissage.

Les rainures sont de dimensions variables déterminant d'une façon progressive la forme finale à produire.

Cette disposition des plateaux est adoptée pour la fabrication des petits projectiles; nous signalerons dans la deuxième partie la rouleuse à disques conçue par Fairbairn (1890).

Roulage avec cylindres. — On obtient une variante du procédé de roulage au moyen de deux cylindres excentrés dont

l'un est intérieur à l'autre *(fig. 273)*. Le cylindre A est fixe, le cylindre B tourne autour d'un axe horizontal ou vertical; la pièce, engagée par la plus grande ouverture C, sort en D par la plus petite ouverture après avoir été entraînée, roulée, pétrie entre les parois striées lorsque les pièces sont des loupes de puddlage, application principale de ce mode de travail.

La pièce peut encore être roulée entre deux cylindres horizontaux tournant en sens contraire *(fig. 274)* et un cylindre-came excentré produisant la pression.

Ou encore, entre trois cylindres-cames *(fig. 275)* agissant progressivement pour réduire les dimensions transversales.

S'il s'agit d'une pièce creuse, telle qu'un tuyau, la machine comporte, en outre des trois cylindres, un mandrin intérieur emboîté par la pièce.

Le procédé de roulage avec trois cylindres ou galets est appliqué au cylindrage des arbres de transmission en opérant à froid, et à diverses autres fabrications qui seront signalées ultérieurement.

Pour moulurer les métaux, le laminoir rouleur peut être employé si les formes sont simples et de révolution. Celui *figures 4* à *7* (1), *planche L*, comporte deux cylindres excentrés CC′ dont l'écartement correspond à la fabrication d'une pièce donnée. Ces cylindres sont pourvus de cannelures ou profils en rapport avec la forme des moulures à produire, ou bien les pièces de forme, en plusieurs parties, peuvent être rapportées sur un arbre central, ce qui facilite l'exécution.

Le morceau de métal chauffé est introduit latéralement au-dessus des cylindres CC′ au moment du maximum d'écartement produit par leur révolution, le morceau remplissant le plus possible l'espace vide. En tournant, les surfaces des cylindres se rapprochent par suite de l'excentricité; la pièce, reposant sur un support approprié, prend un mouvement de

(1) Brevet du 18 octobre 1889. MM. Jeunehomme et Lepault.

rotation pendant qu'elle reçoit la forme des moulures creusées dans les cylindres tournant dans le même sens. Au moment où ceux-ci ont dépassé leur point de plus grand rapprochement, la pièce se trouve dégagée.

Cette machine permet, par exemple, de préparer d'une seule passe et d'une seule pièce les formes *(fig. 8)* qui reçoivent un complément de forme *(fig. 9.)* On adopte, de préférence, des ébauches ou des pièces doubles disposées d'une façon symétrique, de manière à équilibrer les réactions longitudinales.

Roulage et chauffage électrique simultanés.

Le laminage des pièces par roulage avec chauffage électrique sur la machine a été proposé par M. Burton en disposant les organes comme l'indiquent les *figures 10* à *19* (1), *planche XXXIV*.

Un câble électrique + A est relié au pôle positif d'une machine dynamo-électrique, et un câble — A′ est relié à son pôle négatif ou *vice versa*.

Une extrémité du câble A est reliée à un commutateur B et un câble C est relié par un bout à ce commutateur et est muni à l'autre bout d'une pince D embrassant la barre à forger E en arrière d'un appareil alimentaire, pince qui est pourvue d'un collier D′ permettant à la barre de tourner sur son axe sous l'action des matrices.

L'extrémité du câble — A′ est reliée à une électrode réglable automatiquement F, avec laquelle l'extrémité antérieure de la barre vient en contact après que cette dernière a reçu son mouvement d'avancement. Les matrices étant écartées et le circuit rompu, comme il est indiqué *(fig. 14)*, la barre E qui doit servir à faire les pièces désirées, telles que poignées, broches de filatures, obus coniques, boutons filetés, etc., est amenée à travers l'œil isolé G, le manchon d'entraînement isolé H et l'œil isolé I, entre le chariot à mouvement de va-et-vient J et la roue matrice K, au contact de l'électrode F réglable automati-

(1) Brevet du 6 mai 1890.

quement; puis, on applique sur l'extrémité extérieure de cette barre la pince réglable D qui constitue l'autre électrode. L'opérateur peut alors fermer le circuit par la barre en amenant le doigt L du commutateur en contact avec la borne M et un courant de grand volume passe alors dans la barre. La résistance de celle-ci étant beaucoup plus grande que celle des câbles conducteurs, il se développe rapidement de la chaleur dans la barre, d'après le principe bien connu de l'action électrique. Le circuit est tenu fermé jusqu'à ce que la barre ait atteint la température voulue pour le travail de forge, puis on libère le doigt du commutateur que le ressort N éloigne de la borne M, ce qui rompt le circuit.

On met alors la machine en marche; la matrice en forme d'arc K'P oscille dans le sens de la flèche P *(fig. 14)*, et la matrice à mouvement de va-et-vient J se déplace en sens contraire. Pendant cette phase, le circuit reste ouvert, aucun courant ne passe dans la barre, et la pièce laminée telle que R, se trouve forgée par suite de la rotation de la barre sur son axe, entre les matrices, à angle droit par rapport au mouvement de ces dernières *(fig. 17)*. La table-matrice J et la roue-matrice K se meuvent d'une quantité suffisante pour que les matrices abandonnent la pièce et cessent d'être en contact *(fig. 13)*. Dès que la barre se trouve dégagée, l'extrémité inférieure d'une came *(fig. 13)* vient rencontrer la face isolée du doigt L' du commutateur et le fait tourner de manière à l'amener en contact avec la borne M, en fermant ainsi le circuit et en envoyant de nouveau un courant dans la barre afin de la chauffer. Le renversement de marche des matrices peut être réglé pour permettre de réchauffer suffisamment la barre, particulièrement si la section est forte. Le jeu du commutateur est réglé de sorte qu'aucun courant ne passe pendant que les matrices sont en contact avec la pièce qui se détache de la barre à la fin du façonnage. Le procédé est applicable aux machines à rouler comportant deux matrices rotatives.

III. — Laminage hélicoïdal.

Le laminage hélicoïdal est intermédiaire entre le laminage longitudinal et le laminage transversal. C'est un laminage oblique qui permet de produire des déplacements hélicoïdaux des fibres à pas variable ou constant.

La pièce et les outils sont animés d'un mouvement relatif hélicoïdal généralement décomposé en translation et en rotation simples ou combinées. Les outils sont, le plus souvent, des cylindres ou des disques animés du mouvement de rotation. La pièce possède un mouvement de translation et de rotation à vitesses variables qui produisent des torsions dont l'effet s'ajoute au laminage proprement dit.

Ce procédé permet l'obtention de pièces à sections circulaires constantes ou variables, de vis, de tubes, de pièces de formes diverses lorsqu'on le combine ou non avec le procédé de mandrinage.

Les outils présentent différentes dispositions générales.

Dans l'application au finissage des barres rondes qui est l'une des premières du laminage hélicoïdal, le laminoir *(fig. 276)* (1) comporte quatre rouleaux à axes parallèles tournant dans le même sens. Les rouleaux, de forme conique sur la plus grande partie de leur longueur, présentent, du côté de l'entrée, des parties filetées de manière que la pièce entraînée longitudinalement par le contact des filets qui forment écrou, s'engage avec force vers les parties lisses où elle se régularise avec précision.

L'avancement longitudinal à l'entrée est, pour un tour des rouleaux, égal au pas p de la partie filetée, le déplacement rotatif est égal à πd, d étant le diamètre moyen des cylindres; le rapport des vitesses longitudinale et rotative est $\frac{p}{\pi d}$. Ce rapport

(1) Laminoir Teillard, brevet du 7 juillet 1864.

est établi de manière à rouler la pièce plutôt qu'à l'étirer longitudinalement lorsqu'il s'agit de finissage.

Si l'on admet qu'il n'y ait aucun glissement sur les outils et sur la pièce, celle-ci se trouve tordue progressivement.

Fig 276

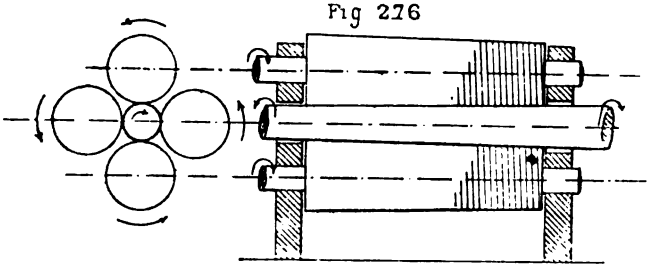


Fig 277

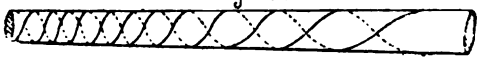


Fig 278

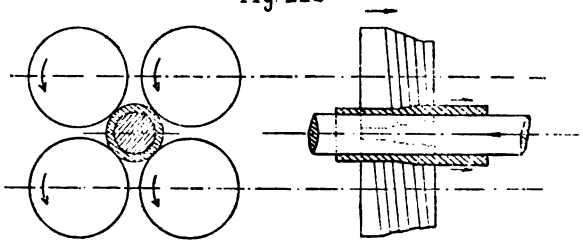
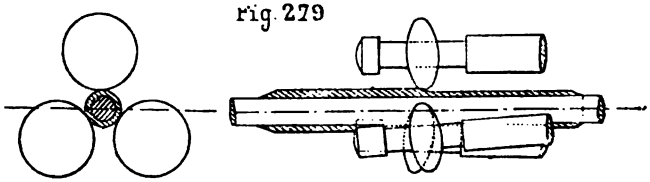


Fig 279



d' étant le diamètre moyen de la partie filetée à l'entrée, d'' le diamètre des rouleaux à la sortie, d_1 le diamètre de la pièce à l'entrée, d_2 son diamètre à la sortie : pour un tour des rouleaux, le nombre de tours de la partie d'entrée de la pièce

serait : $t' = \frac{\pi d'}{\pi d_1} = \frac{d'}{d_1}$; le nombre de tours de la partie sortante de la pièce serait : $t'' = \frac{d''}{d_1}$; et si l est la longueur des rouleaux, le nombre de spires d'hélices étant $t'' - t'$, le pas moyen des hélices dues à la torsion de la pièce serait $\frac{l}{t'' - t'}$.

La torsion est ordinairement moindre, attendu que vers la sortie l'adhérence diminue et n'est pas suffisante pour vaincre la résistance de torsion ; il se produit des glissements favorables à la régularisation et au polissage de la surface.

C'est aussi pour assurer une grande précision de fini que les rouleaux sont terminés par des parties cylindriques.

La torsion s'exerçant simultanément ou successivement d'une façon continue sur les diverses fibres d'une zone de la pièce, les génératrices primitivement rectilignes se tournent en hélice de manière que deux génératrices correspondant aux extrémités d'un même diamètre sont devenues deux hélices opposées, mais de même pas et de même sens d'inclinaison par rapport à l'axe de la pièce ; c'est-à-dire que toutes les hélices extérieures correspondant aux diverses génératrices sont toutes de même pas progressif et de même sens *(fig. 277)*, la progression du pas cessant lorsque la pièce quitte les cylindres.

Lorsqu'il s'agit d'étirer un tube sans soudure, celui-ci est monté sur un mandrin *(fig. 278)* (1) qui sert à soutenir la paroi, qui constitue un rouleau intérieur concourant avec les quatre rouleaux extérieurs à l'opération ; le laminage se fait ainsi sur quatre zones deux à deux opposées.

Pour activer le travail, les rouleaux extérieurs sont à surface hélicoïdale déplaçant le métal progressivement dans le sens de la longueur ; les parties lisses régularisent la surface.

Indépendamment du mouvement de rotation dans le même sens, les quatre rouleaux montés sur un support commun

(1) Brevet Clowes et Randolph du 15 juillet 1890.

possèdent un mouvement longitudinal. La pièce tourne en sens contraire par l'effet de l'adhérence des rouleaux; la partie non laminée glisse sur le mandrin à mesure que le tube s'allonge.

Les galets étant courts, la torsion est relativement faible.

On obtient directement le déplacement hélicoïdal du tube en disposant les galets comme *figure 279* (1). Trois galets sont montés sur des arbres obliques et tournent dans le même sens. Le galet supérieur s'oblique à droite suivant une horizontale, les deux autres obliquent aussi à droite et en même temps en diagonale; celui de droite incline en avant, celui de gauche penche en arrière de manière à former entre eux trois une ligne de contact hélicoïdale sur le tube.

Les galets réduisent l'épaisseur en opérant par passages successifs intermittents ou alternatifs en changeant le sens de la rotation.

Parfois, le mandrin est commandé pour la rotation et les galets sont entraînés par l'adhérence, ce qui n'est pas toujours possible parce que le laminage a pour effet d'augmenter le diamètre intérieur du tube, et, par suite, de supprimer le frottement nécessaire à l'entraînement. Mais, pour des pièces pleines, pour la régularisation des barres rondes, des arbres de transmission, pour l'étirage peu prononcé de barres de cuivre ou autres métaux se forgeant à froid, cette disposition simplifie les organes de la commande.

Dans le laminage hélicoïdal avec galets obliques, les composantes du déplacement des molécules extérieures en contact avec les outils prennent des valeurs proportionnelles aux vitesses V cos α et V sin α *(fig. 280)*, α étant l'angle de l'axe de la pièce et de l'axe du galet. La composante V cos α se rapporte au mouvement de rotation que tendent à prendre la pièce et les molécules extérieures. La composante V sin α se rapporte

(1) Brevet Brocard du 26 novembre 1863.

au mouvement longitudinal suivant l'axe de la pièce. Si celle-ci ne prend pas la vitesse V sin α, ce sont les molécules en contact qui se déplacent tout en produisant un certain entraînement des molécules voisines.

Le laminage hélicoïdal se prête bien au filetage des tiges. La pièce *(fig. 281)*, convenablement guidée, peut être placée entre deux galets qui tournent dans le même sens l'un en face de l'autre, extérieurement ou intérieurement, et dont les parties cylindriques ou légèrement coniques qui opèrent portent des empreintes hélicoïdales qui correspondent à la vis à produire. L'inclinaison du filet de vis peut être obtenue de différentes manières. En plaçant les axes des galets parallèlement, l'angle d'inclinaison du filet ne peut être produit qu'en refoulant le

Fig. 280

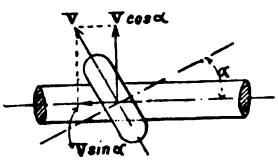
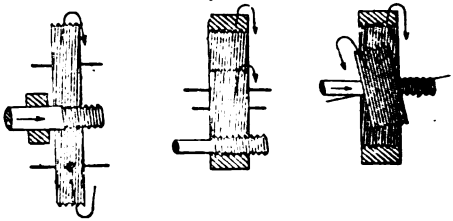


Fig. 281



métal dans les surfaces de compression, exactement sous cet angle par rapport à l'axe de rotation. En disposant les axes de rotation des galets sous l'angle du filet qu'ils présentent eux-mêmes, il se forme sur la tige des filets de pas égal à zéro, c'est-à-dire des collets et rainures annulaires. On conçoit qu'entre ces limites, il est possible de façonner des filets d'inclinaison variable à volonté et par suite de pas variables avec le diamètre de la tige.

Le temps pendant lequel la pièce reste entre les outils correspond, pour la première disposition, au nombre de filets qu'elle comporte. La tige avance d'un pas à chaque tour que font les galets ; la durée étant limitée, les filets peuvent être insuffisamment bien formés.

En variant les inclinaisons, on peut limiter à volonté la so
de la pièce; on réduit l'angle des deux axes de rotation
galets et l'angle des filets par rapport aux axes de rotation.
somme de ces angles réduits est égale à l'angle des hélices du fi

Selon le rapport des deux angles réduits, on peut faire so
la tige avec une vitesse variant de zéro à un pas de vis
révolution de la tige. On peut faire exécuter à cette dernière
nombre quelconque de révolutions sur elle-même, pend
qu'elle sort de la machine d'une quantité voulue. De ce
façon, le roulage prononcé refoule mieux le métal, les fil
sont mieux achevés, il est possible de réduire le diamètre d
pièce et de donner à la partie filetée un diamètre extérieur p
petit que celui du fer rond, de grosseur courante.

Par exemple, une tige doit avoir un pas incliné à 30 degr
Si on juge de faire passer trois fois l'outil sur chaque point
filetage, on divise l'angle de 30 degrés en trois parties égal
10 degrés, et, l'inclinaison des empreintes, par rapport à l'
de rotation, sera de 20 degrés. On peut ainsi employer
anneaux étroits qui présentent des filets variés suivant
besoin.

Les *figures 1* à *4, planche XXXV* (1) sont relatives à
machine à fileter ou fileteuse (2) basée sur ces principes. I
comprend deux galets A montés sur des arbres B tourn
dans le même sens par commande à engrenages et poulies.

A mesure que le filet se forme sur la tige P, les deux ga
doivent se rapprocher pour lui donner la profondeur,
dimensions voulues. A cet effet, les arbres B sont reliés à
colliers M solidaires de vis V de filets à pas contraires.

Des brides H, formant écrous des vis V, font avancer
reculer les arbres B, en appuyant sur la pédale D reliée
écrous H par une traverse E.

---

(1) Machine Simon, brevet du 29 juin 1878.

(2) Le mot fileteuse est beaucoup mieux approprié que celui : taraud
donné ordinairement.

Pour faire varier l'inclinaison des arbres B, des colliers N, voisins des engrenages, peuvent glisser sur des supports S; ensuite, ils sont maintenus par des boulons.

L'arbre O des engrenages intermédiaires peut se déplacer de manière à assurer l'engrènement convenable. Pour les vis à dimensions variables et pour certaines fabrications, le déplacement des arbres B se fait automatiquement au moyen de cames.

Certaines fileteuses sont munies de trois ou de quatre galets; dans ce dernier cas, les deux galets supérieurs sont un peu plus gros que les deux inférieurs, de manière que l'obliquité des empreintes sur un petit cylindre ne soit pas tout à fait égale à celle sur un grand. On obtient ainsi un filet de vis plus uni et plus exact. Les galets ne sont ordinairement pas trempés, ils ont un diamètre moyen de 50 à 80^{mm} ou plus. Les rainures hélicoïdales ébauchées au tour sont terminées sur la machine elle-même, avec le taraud-mère.

Nous indiquerons encore ici *(fig. 5 à 16, planche XXXV)* une fileteuse par pression, pour former à froid le filet de vis sur un fil métallique de longueur indéterminée (1).

Le fil est avancé par une paire de rouleaux-guides R, R′ qui l'empêchent de tourner, tout en le faisant avancer à la vitesse voulue. Ces galets R, R′ sont à gorges avec de petites saillies ou des dents serrant le fil. Ils sont pressés l'un contre l'autre au moyen de vis agissant sur les coussinets d'appui de leurs arbres.

Dès sa sortie des galets guides, le fil passe entre deux cylindres fileteurs *c, c′ (fig. 9* et *10)*, dont l'un est une bague à rainures intérieures hélicoïdales ou circulaires et l'autre est un cylindre extérieur ou proprement dit à surface de pourtour également muni de rainures. Ce sont les outils fileteurs.

Ils tournent à des vitesses circonférentielles égales, de manière

(1) Brevet Dorman du 13 mai 1889.

à déterminer le minimum de frottement ou de torsion sur la pièce filetée.

Il convient que l'angle du filet des cylindres soit tel, que pendant une révolution du cylindre *c*, le filet s'avance d'une distance égale à la moitié du pas de vis à produire.

L'avancement donné au fil par les galets R, R′ doit également être égal à la moitié du pas de la vis V. Le pas des cylindres et celui de la vis V sont égaux.

Il en est de même si les cylindres fileteurs ont des gorges annulaires, et, dans ce cas, la bague et le cylindre sont montés sous des angles tels que les filets circulaires de chacun d'eux se trouvent au même angle que l'angle moyen du filet qu'il s'agit de former sur le fil *(fig. 15)*.

Au début de l'opération, on amincit le bout du fil sur une distance excédant un peu la distance entre les cylindres fileteurs et la bobine d'enroulement du fil E.

Cet amincissement est tel que le fil puisse passer entre les cylindres sans les toucher. Ce fil passe à travers l'arbre creux A *(fig. 12)*, puis on le fixe à la bobine E *(fig. 6)* dont la rotation entraîne le fil petit à petit entre les fileteurs qui y forment un filet. La bobine est de plus animée d'un mouvement de va-et-vient pour que l'enroulement du fil se fasse uniformément sur toute sa largeur de jante. Le fil métallique s'avance suivant l'axe de l'arbre de commande A qui est creux et repose sur les paliers BB′. Cet arbre porte la poulie P recevant la courroie motrice.

Sur le bout antérieur de l'arbre A est montée une couronne G *(fig. 13, 14, 15* et *16)*, portant les cylindres fileteurs CC′ qui tournent par suite avec l'arbre A.

A l'arrière de la couronne G est placée une roue dentée F qui est fixe et qui, par l'intermédiaire de roues montées sur la couronne G, détermine la rotation des cylindres lamineurs CC′.

La commande des cylindres d'alimentation est produite par

les roues H, I, J, K, l'arbre L, la vis sans fin N et la roue correspondante O et les roues R_1 R_1', montées sur les arbres des galets RR' *(fig. 5 et 6)*.

La commande de la bobine d'enroulement comporte une vis sans fin calée sur le bout postérieur de l'arbre L, la roue M montée sur un arbre creux recevant l'axe portant la bobine E.

Cet arbre *a* porte encore une vis sans fin T engrenant avec la roue T' montée sur un arbre pourvu d'une came V agissant sur le levier double X qui actionne l'arbre de la bobine longitudinalement pendant sa rotation.

Le filetage sans enlèvement de matière se fait à froid pour les petites tiges, les vis à bois de faibles dimensions; il se fait à chaud pour les fortes dimensions, pour les vis telles que tire-fonds, boulons, tiges d'accrochage, vis de vérins, etc., dont la longueur primitive, soit celle de l'ébauche, peut parfois être réduite de un quart de la longueur définitive, ce qui constitue une économie de matière sensible sur le procédé de filetage par enlèvement de métal.

Le filet est triangulaire, carré, arrondi et peut présenter un fini comparable à celui des vis dégagées avec des coussinets de filière.

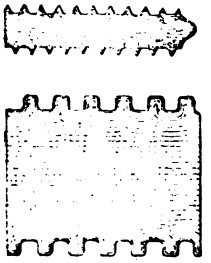
Les filets laminés exigent moins de main-d'œuvre, l'opération se fait plus rapidement; les fibres du métal ne sont pas interrompues, sont fortement serrées, le filet est plus résistant. La *figure 282* indique la disposition que prennent les fibres en coupe longitudinale.

Lorsque le filetage est prononcé, comme dans les tire-fonds de forme conique, on constate assez souvent, par la rupture, un vide central dû au roulage et à l'étirage superficiel hélicoïdal qui se font avec grande intensité.

Le laminage hélicoïdal a encore été réalisé au moyen de plateaux ou disques plans rotatifs agissant sur la pièce placée à peu près diamétralement entre les deux disques.

La disposition *figure 283* (1) a été appliquée, tout d'abord, au finissage des barres rondes, des tubes. La pièce est supportée librement et guidée par des supports *ad hoc*. Si on suppose que les plateaux se rapprochent à volonté pour serrer la pièce et tournent dans l'un ou l'autre sens à volonté, une barre de diamètre donné pourra être réduite à un diamètre plus petit par passages alternatifs entre les deux outils, dont l'action est très différente selon que la pièce prend contact suivant un diamètre ou suivant une corde, suivant que les axes des disques sont en prolongement, ou parallèles, ou obliques, enfin suivant qu'ils tournent dans le même sens ou en sens inverse.

Fig 282



Si nous supposons la pièce en contact suivant le diamètre horizontal de chaque disque tournant dans le même sens *(fig. 284)*, le frottement aurait pour effet d'entraîner la pièce avec les disques autour de l'axe commun des disques. Mais, si la pièce est maintenue contre cette rotation, chaque disque tendra à la faire rouler simultanément dans les deux sens. Si les effets, qui se contrarient, s'équilibrent, la pièce restera immobile et des glissements se produiront sur les deux génératrices de contact. Pratiquement, cet équilibre est difficile à réaliser. Si les deux disques tournent en sens contraire (A'B''), la pression étant faible, les effets seront analogues, les frottements s'équilibrent sur chaque diamètre en formant un couple.

Il faudrait donc imprimer à la pièce un mouvement propre de translation et de rotation; les glissements des disques poliraient ou régulariseraient simplement la surface.

Si les pressions sont fortes, l'adhérence suffisante, les disques

(1) Brevet Lauth du 10 mars 1874.

tournant en sens contraire (A′B″), les vitesses de roulement étant différentes (proportionnelles aux distances du centre aux divers points de contact), la pièce sera torsionnée de chaque côté en sens inverse, depuis le centre du disque jusqu'au pourtour. Cette torsion progressive est assez complexe et ne saurait être étudiée à fond ici.

Notons que, sous l'effet du laminage, la pièce serait étirée de chaque côté du centre, le métal s'écoulant par les deux bouts du diamètre.

Lorsque la pièce est en contact suivant une corde horizontale *(fig. 285)*, le mouvement circulaire de vitesse V en un point M du contact et dirigé suivant la tangente de rotation, donne lieu à des composantes de translation longitudinale telles que $V' = V \cos \alpha$ et à des composantes de roulement

$$V'' = V \sin \alpha.$$

Les vitesses V sont proportionnelles aux distances des divers points de contact de la corde au centre O.

La distance d'un point M peut être exprimée par la relation

$$r_1 = \frac{OC}{\cos \alpha} = \frac{r_0}{\cos \alpha}.$$

La vitesse étant représentée par les distances telles que OM, on voit qu'elle est maximum au pourtour, minimum et égale à OC au milieu de la corde de contact. Les composantes de roulement sont aussi plus grandes au pourtour qu'au centre. On peut poser

$$V'' = V \sin \alpha = r_1 \sin \alpha = \frac{r_0 \sin \alpha}{\cos \alpha} = r_0 \operatorname{tg} \alpha;$$

pour $\alpha = 0$, la composante de roulement s'annule.

La composante de translation V′ est constante ; en effet

$$V' = V \cos \alpha = r_1 \cos \alpha = \frac{r_0 \cos \alpha}{\cos \alpha} = r_0.$$

Ainsi, les composantes de translation sont mesurées par $r_0 = OC$; ces vitesses ont toutes même sens sur un même

Fig. 283

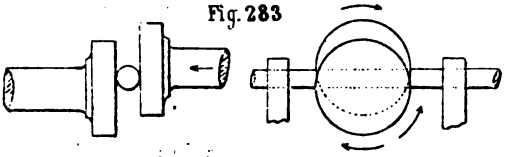


Fig. 284

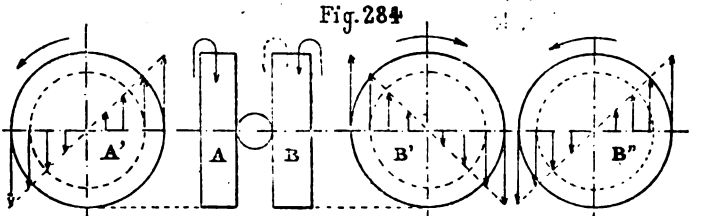


Fig. 285

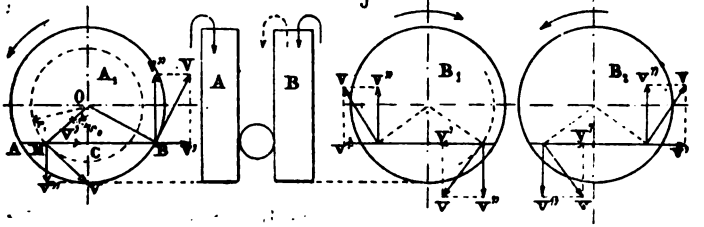


Fig. 286

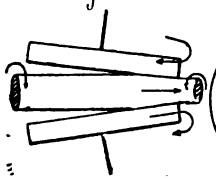


Fig. 287

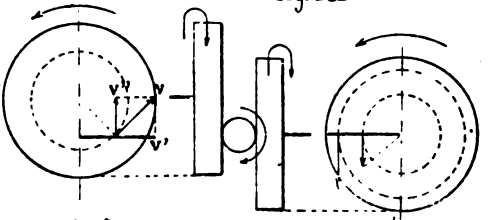


Fig 288

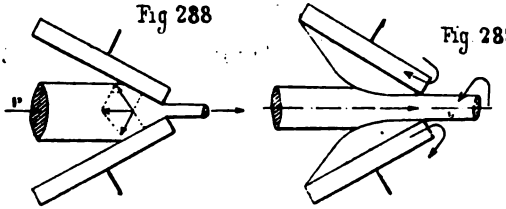
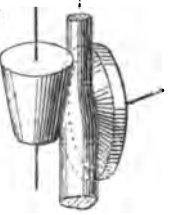


Fig 289



disque, tandis que les composantes circulaires sont de sens inverse sur chaque moitié de la corde de contact.

En plaçant le deuxième disque B *(fig. 285)* dans la position des axes en prolongement, et si les disques tournent dans le même sens (A_1B_1), les composantes de translation s'ajouteront de chaque côté, les composantes de roulement se neutraliseront encore de chaque côté également, et ne produiront ni roulement, ni torsion.

La pièce pourra ainsi se déplacer longitudinalement sans rouler.

Pour obtenir le roulement, la translation étant alors supprimée, il faut faire tourner les disques en sens contraire (A_1B_2); la torsion se produira de part et d'autre du centre des disques.

Si l'on veut obtenir la translation et le roulement simultanés, il faut ne faire agir les disques que sur les moitiés en regard des génératrices de contact, soit *(fig. 286)* en obliquant les axes des disques et en les faisant tourner en sens contraire.

En déplaçant la pièce verticalement, c'est-à-dire en la rapprochant ou en l'éloignant des centres de rotation, on pourra donner à l'un ou à l'autre des deux mouvements de translation ou de roulement une valeur à volonté.

Comme les vitesses sont différentes en chaque point de contact, en progressant du centre vers le pourtour, il se produit, soit des glissements polissant le métal, soit des torsions disposant les fibres du métal en hélice dans une seule direction.

Il convient de disposer les disques de manière que l'un soit un peu plus élevé que l'autre *(fig. 287)*, afin d'annuler sur l'un des disques les composantes longitudinales, soit celles qui agissent en sens contraire du mouvement de translation convenable. La pièce se trouve alors à l'aplomb de l'axe du disque B, le contact ayant lieu suivant une portion de diamètre, tandis que sur le disque A, le contact se fait sur une

portion de corde, et c'est ce dernier contact qui donne les composantes de translation.

De cette manière, les composantes de roulement sont prépondérantes sur le disque B, et celles du disque A forment avec celles de B, des couples qui roulent la pièce avec des vitesses variables, sensiblement proportionnelles à la distance des points de contact au diamètre vertical de chaque disque, si on admet qu'il ne se produit pas de glissements.

La vitesse angulaire de roulement de la pièce est beaucoup plus grande à la sortie qu'à l'entrée. Ainsi, vers l'aplomb des centres, la rotation pourrait être nulle, tandis que vers la sortie, pour un tour du disque de diamètre d, la pièce ayant un diamètre d', le nombre de tours de la pièce serait, à cet endroit, sensiblement $\frac{d}{d'}$.

Les vitesses variables de roulement ont donc encore pour effet de tordre la pièce ou de déplacer le métal superficiel en hélice si la résistance de torsion générale est plus forte que l'étirage localisé. De même que, dans le laminage longitudinal, la translation de la pièce ne peut avoir lieu qu'autant que la résultante des frottements est supérieure à la résultante des réactions des disques sur la pièce, sinon, il y aurait patinage.

On ne saurait donc, comme *figure 288*, incliner les disques, produire une réduction de diamètre, au delà d'une certaine limite déterminée par le coefficient de frottement, qui est toujours un facteur des plus importants. Avec une forte réduction, il faudrait pousser la pièce, y faire agir une force P. L'obliquité prononcée des axes a conduit à adopter des disques coniques ou à profil courbe *(fig. 289)* dont l'action est analogue à celle des disques plans. On voit aussi qu'en faisant varier l'angle des axes jusqu'à ce qu'ils deviennent parallèles ou rectangulaires, on retrouve la disposition à galets dont le profil peut varier à volonté selon les nécessités du travail.

En résumé, suivant la position générale relative des outils

et de la pièce, cette dernière pourra rester immobile, tourner sur place, avancer ou reculer avec des vitesses variables, se réduire en section et s'allonger ou se régulariser ; et ces déplacements pourront se faire à volonté si le laminoir est disposé convenablement.

Parmi les laminoirs à disques, signalons *(fig. 17, 18, 19, pl. XXXV)* celui de M. Reinhard-Mannesmann dont les dispositions se prêtent à la réalisation de conditions variables de marche, soit pour l'étirage des lingots d'acier, le soudage des paquets et loupes de fer avec rapidité, pendant qu'ils possèdent leur haute température, soit au façonnage de pièces diverses en utilisant ou non des mandrins auxiliaires.

Dans la *figure 17* (1), les plateaux sont inclinés un peu l'un vers l'autre sur leurs axes horizontaux, et l'axe de l'un est un peu plus élevé que celui de l'autre. Les deux axes de ces plateaux reposent sur deux paliers symétriquement disposés et reliés entre eux par une traverse boulonnée qui permet de changer l'inclinaison à volonté. La différence de hauteur entre les deux axes se règle très simplement par des cales. L'action motrice est reçue par l'arbre E ; le pignon K la transmet, en partie, au pignon L ainsi qu'à l'arbre du plateau qui y est relié par un ressort et un joint à rainure et languette M, et en partie, par l'arbre accouplé EF, au pignon O ; ce dernier, par le pignon intermédiaire P, fait tourner en sens contraire du premier plateau, le pignon Q, relié à l'axe du second plateau.

La masse de métal est introduite en R et sort en S, la vitesse de la périphérie étant plus grande en S qu'en R.

Les deux plateaux AB tournant en sens opposé produisent la rotation de la pièce. Deux guides horizontaux, de positions variables suivant les dimensions à produire (non représentés sur le dessin), maintiennent la pièce convenablement dans la direction du déplacement longitudinal.

(1) Brevet du 27 janvier 1885.

Les points des disques attaquant une même circonférence de la pièce ne l'abandonnent plus dans le sens du mouvement, mais se meuvent tous deux en même temps et un peu en avant dans la direction de l'axe de la pièce, et cela d'autant plus que la différence de hauteur entre les plateaux est plus sensible.

Par le frottement sur les plateaux et proportionnellement à leur vitesse de rotation, la pièce est conduite en avant et vers l'endroit le plus étroit des plateaux; d'une part, vers la sortie, la vitesse de rotation de la pièce augmente constamment, et de l'autre, le diamètre de la pièce diminue en se rapprochant de la sortie, de sorte que, par ces effets simultanés, la torsion des fibres se produit et augmente sensiblement. A cette torsion, la matière oppose une grande résistance, les fibres extérieures sont fortement étirées et l'aplatissement partiel qui pourrait se produire entre les disques plans est évité; il ne se produit, pour ainsi dire, que de l'étirage.

Il est possible, par un changement de l'excentricité des deux disques (l'excentricité étant la différence d'écartement des axes des plateaux dans la position verticale par rapport à l'axe moyen) et de leur inclinaison réciproque, d'obtenir à chaque point des plateaux le moindre degré de changement de forme, puisque, l'excentricité diminuant, l'hélice que décrit un même point de la pièce entre les plateaux devient toujours plus étroite. De même, le cône que la pièce parcourt en passant d'une dimension plus grosse à une moindre augmente progressivement l'étirage, en raison de l'augmentation du nombre de rotations causée par le rapprochement des centres des disques jusqu'au moment où l'écartement des périphéries est le même.

Le changement de l'excentricité et de l'inclinaison pour tous les points des plateaux est obtenu par les pièces du bâti par réglage à l'arrêt; cependant, il peut se faire aussi pendant la marche avec des dispositions particulières. On peut donc régulariser à volonté les changements de forme et de dimensions.

On peut laminer rond toute dimension voulue par une légère

variation dans la position de l'un des plateaux, simplement en l'avançant ou le reculant dans le sens de l'axe, et par un changement correspondant de l'excentricité. Ce mouvement peut être donné en même temps aux deux disques dans la direction de l'axe avec des dispositifs à engrenages particuliers.

Ce laminoir est universel, pour ainsi dire, dans toute l'acception du mot, car, en y changeant seulement quelques pièces, on peut obtenir toutes les espèces de fers profilés, toutes sortes de tuyaux, arbres creux, tubes filetés, tuyaux à ailettes intérieures ou extérieures, transversales en biais ou parallèles à l'axe, des tuyaux ou tubes à parois inégales, des poutrelles creuses, des barres ou tubes avec dents d'engrenage intérieures ou extérieures; barres pour fraises, alésoirs, en un mot toutes pièces de profils impossibles ou difficiles à obtenir avec les autres laminoirs.

En diminuant successivement l'excentricité des axes des plateaux vers la position moyenne, le mouvement progressif de la pièce diminue jusqu'au point de cesser quand les axes coïncident. En renversant l'excentricité des disques, la pièce prend un mouvement rétrograde, sans changement essentiel pour la vitesse ou le sens de la rotation des cylindres ou de la pièce. Si les cylindres sont de forme symétrique, ils travaillent aussi bien en avant qu'en arrière.

En munissant les disques d'une saillie annulaire étroite, on peut laminer, par renversement des fers de châssis, des pièces façonnées dans le sens de leur longueur, des parties à profil variable, quelles qu'en soient les dimensions, et, avec un seul laminoir, parce qu'à tout instant on peut ralentir ou accélérer la marche de la pièce et aussi, grâce aux vis de pression, changer à volonté le diamètre aux endroits voulus.

Les mêmes résultats peuvent être obtenus en employant, au lieu de plateaux plans, des plateaux coniques ou convexes, ou mieux encore des disques un peu concaves, ou des plateaux en forme de gobelets plats; ces derniers agissent mieux parce

qu'ils maintiennent automatiquement la pièce au milieu et favorisent moins la production des vides au centre. Ils conviennent particulièrement pour le laminage des grosses pièces.

Pour l'étirage des gros blocs il est aussi préférable d'employer un trio ou un quatuor de disques agissant au plus près d'une même circonférence du bloc, ainsi que le montrent les *figures 20 à 23*. Dans ce cas, les parties centrales ne peuvent se séparer tout en produisant une réduction très grande de la section. Ce trio est analogue au duo et peut être changé en laminoir réversible en faisant varier l'excentricité. Il permet de laminer des sphères ou des segments de sphères en changeant les roues d'engrenage, en réglant le déplacement latéral des disques opposés l'un à l'autre, de façon que le premier cylindre reste dans sa position normale, tandis que le second fait mouvoir la pièce en avant et que le troisième, outre la rotation normale, la fait mouvoir en même temps en arrière.

Avec deux disques, en dehors de la rotation normale, l'un des disques doit faire mouvoir la pièce en avant, l'autre la fait mouvoir en arrière et empêche tout mouvement de celle-ci en avant, en arrière et de côté. La pièce peut donc recevoir, outre la rotation parallèle à la direction du mouvement du cylindre en position normale, un mouvement de rotation dans un sens incliné. Les disques délimitent donc constamment les plus grandes circonférences d'une sphère et produisent soit une sphère complète, soit une partie de sphère, dès que le mouvement en avant ou en arrière de la pièce est supprimé, et suivant la proportion du déplacement des axes entre eux.

On peut, par suite, laminer, rouler des sphères complètes aussi bien que des pièces façonnées avec parties sphériques, par exemple des axes et pivots à rotule.

En employant extérieurement trois disques creux, la pièce est maintenue au milieu, l'étirage sphérique peut avoir lieu entre eux trois sans autre délimitation de la pièce.

Avec deux ou trois disques de la forme *figure 290*, on peut

laminer; par suite de la réversibilité du laminoir, des pivots à collets ou des supports de forme analogue.

Des disques *figure 291* permettent de façonner, avec de gros lopins refoulés, des boulons à tête pointue, en les coupant à longueur.

En appliquant des disques *figure 292* et en changeant les engrenages qui commandent les crapaudines, de manière que l'un des disques ne tournant pas, le second tourne à droite et le troisième à gauche, on lamine des parties sphériques, dont le diamètre est variable à volonté à partir du plus faible écartement des cylindres.

Fig. 290

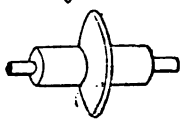


Fig. 291

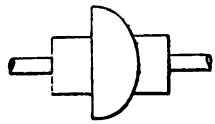
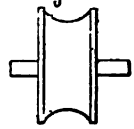


Fig. 292



Pour la fabrication des barres ou pièces profilées extérieurement ou intérieurement, on dispose à la sortie des disques un calibre finisseur recevant la pièce poussée en avant par le disque oblique du laminoir duo, d'une façon tellement énergique qu'elle pénètre dans la forme du calibre de façon à remplir exactement les moindres recoins du calibre, sans pour cela refouler la matière, le débit étant réglé exactement par la variation à volonté, de la distance des deux disques par la vis de pression. On peut obtenir de cette façon toute une série de dimensions et de profils en travers par un seul passage de gros blocs, par exemple, le profil de roues dentées, de cylindres cannelés, etc.

Pour les barres profilées telles que les ⊓ ⊥ on adopte des *nez de laminage* ou pièces de forme qui s'impriment dans la masse laminée lorsque celle-ci s'avance par l'action des disques. Ces nez ou mandrins ne peuvent avancer; ils sont retenus,

de sorte que le métal glisse sur eux en prenant la section correspondante au vide ou passage libre.

Les disques mordent, attaquent le métal par des stries ou par des filets en spirale afin d'assurer l'entraînement. Les mandrins sont en dépouille pour faciliter le moulage progressivement.

En combinant des nez d'entrée et des calibres de sortie, on donne d'abord la forme approchée du profil, de sorte qu'il ne reste pour le calibre que le travail d'achèvement.

Le calibre est disposé, le plus souvent, à pivot, de manière à céder à la rotation de la pièce, sans pourtant pouvoir se déplacer dans le sens des axes des disques.

Si le calibre est à profil tors, la pièce est obligée de prendre la forme tordue. Il est possible, par un seul passage au laminoir, de produire des formes telles que des barres à dents calibrées permettant de faire des engrenages découpés à la barre; des corps circulaires hélicoïdaux ou tordus en spirale, etc.

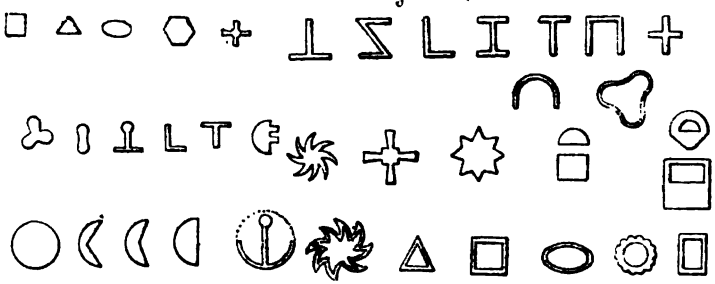
Pour toutes les formes de profil *(fig. 293)* obtenues au calibre, on peut produire la torsion des fibres du métal dans le sens voulu, au dégrossissage du bloc, en communiquant à celui-ci, dans le sens du profil, une torsion dans le sens du nerf voulu, torsion que le calibre lui maintient au façonnage. S'il s'agit de rails en fer étirés, la torsion des fibres présente l'avantage qu'à l'usure, les différentes couches ne se détachent plus à la façon de feuilles qui s'exfolient. Cette position des fibres, inclinée par rapport au sens de l'usure, offre non seulement pour les rails, mais pour d'autres pièces, un avantage marqué.

Si, au lieu d'agir sur l'extérieur de la pièce, le nez agit, soit complètement, soit partiellement, sur l'intérieur *(fig. 294)*, il fait alors office d'une broche M qui élargit la pièce et l'on obtient par un seul passage au laminoir, surtout avec du fer en masse, de l'acier ou tout autre métal, un tube dont le diamètre intérieur est celui de la broche, et le diamètre extérieur est réglé par la distance la plus faible de la périphérie des galets ou des disques.

La broche peut être faite en forme de rouleaux ajustés ou bien seulement munie d'une tête dans la partie postérieure, afin de diminuer le frottement et le refroidissement ; les rouleaux doivent être posés juste en face des surfaces agissantes.

La broche peut aussi porter à sa partie conique antérieure une partie filetée par laquelle elle s'introduit dans la masse de métal, qui peut être préparée ou fondue creuse, ou percée *(fig. 295)* (1).

Fig. 295.



Lorsque le tube doit s'élargir *(fig. 296)*, les disques sont munis de saillies appropriées s'étendant dans un sens plus ou moins parallèle à la direction de l'axe, et on les dispose de façon que les creux produits par l'un des disques aux parois du tube soient croisés par les suivants ; ces saillies servent presque exclusivement à obtenir un élargissement de la matière ou une augmentation du diamètre du tube ; on les désigne par le nom de *collets extérieurs d'élargissement*. Ces collets peuvent être exécutés sous différentes sections : triangulaires, arrondies, etc., et ils diminuent progressivement vers la sortie des tubes jusqu'au point de disparaître complètement afin d'obtenir un tube bien lisse.

La tête M du mandrin tourne avec le tube, ce qui réduit le

(1) Dans la fabrication des tubes sans soudure indiquée dans la deuxième partie de cette étude, nous signalerons les procédés de Robertson qui mettent en combinaison le laminage et le perçage des ébauches massives.

frottement tout en assurant une surface lisse à l'intérieur par glissement longitudinal.

L'emploi de collets donne une économie de travail moteur, et, en leur faisant présenter à la sortie des disques un profil approprié, on peut pratiquer sur les tubes, pendant leur laminage, des molettages, des cannelures ou des saillies et des rainures, qui peuvent être utilisées, par exemple, pour des cylindres de moulin, de broyeurs, les barres à fraises, les alé-

Fig. 294

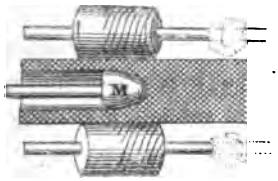


Fig. 296

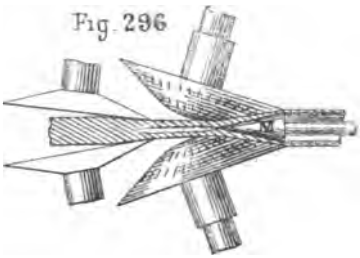
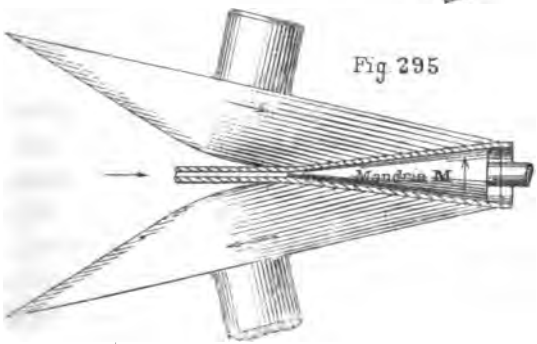


Fig. 295



soirs. En donnant à tous les collets la même inclinaison sur l'axe et à la sortie la forme exacte de dents, les tubes peuvent être obtenus avec des dents correspondantes; par exemple : les dents d'engrenage, dents de fraises, ou toute forme d'ailettes de tuyaux de chaleur.

Si la broche est profilée à la sortie des cylindres sous une forme donnée, le tube reçoit à l'intérieur la forme enveloppe

correspondante; on obtient de cette manière les tubes de chauffage à ailettes intérieures.

En appliquant à la broche un profil tordu, celui de dents de fraises en hélice, ou celui d'un filet de vis, etc., la pièce prend l'empreinte, se moule sur le mandrin. Les dispositions du trio pour éviter les cavernes ou vides centraux peuvent être employées à l'étirage de tubes dont il faut diminuer à volonté le diamètre intérieur, la section transversale en vue d'augmenter la longueur. En donnant, dans ce cas, au mandrin une forme conique susceptible de variations, le diamètre du tube est réglé par le diamètre de la broche conique à l'endroit opposé momentanément à l'extrémité des surfaces actionnées par les disques. Par le déplacement de la broche-mandrin, on peut donc augmenter ou diminuer, à volonté, le diamètre intérieur du tube ou du tuyau.

Le laminoir est toujours universel puisqu'on peut faire varier à volonté le diamètre extérieur en changeant la position des cylindres, pour toutes les dimensions de tuyaux, avec les mêmes cylindres et la même broche.

Comme, de plus, le changement du diamètre intérieur aussi bien qu'extérieur peut à tout moment se faire à tout endroit de la pièce, on peut obtenir des pièces creuses façonnées de tout profil intérieur et extérieurde révolution *(fig. 297* et *298)*, par exemple : des tuyaux avec renflement des bouts, de certaines parties du corps, ou des deux à la fois, des corps en forme d'entonnoir, de cornue, des tubes ondulés de Fox, des tubes à collerettes de Galloway, etc.

Si on engage entre les cylindres un lingot ou pièce ébauchée terminée par un diamètre plus petit que l'écartement des disques, les extrémités ne subiront pas l'action du laminage, qui ne s'exerçant que sur la partie intermédiaire, laissera les extrémités pleines et creusera la partie renflée. On obtient ainsi des récipients fermés aux deux bouts qui peuvent servir pour emmagasiner les gaz liquéfiés nécessitant une grande

résistance. On peut aussi fabriquer des arbres ou essieux à tourillons pleins et corps creux *(fig. 299)* présentant une grande résistance à la flexion et à la torsion. Des éprouvettes découpées dans de telles pièces accusent une ténacité et une ductilité exceptionnelles. La ténacité est encore fortement augmentée, quand on redresse un peu les fibres par un laminage rétrograde ou en sens inverse qui augmente leur feutrage et leur homogénéité. La disposition hélicoïdale des fibres, l'absence de soudure, la nature même de leur fabrication dont

Fig. 298

Fig. 297

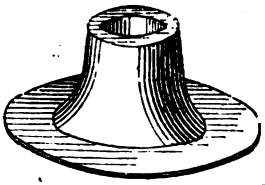
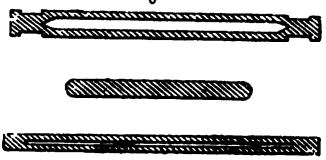


Fig. 299



aucun métal médiocre ne saurait supporter le travail sont des garanties exceptionnelles de bon emploi de ces pièces.

Si l'on élargit une masse en faisant usage du laminoir trio, on peut obtenir, par suite de la disposition symétrique des disques, un tuyau à paroi épaisse d'un diamètre égal au plus grand diamètre du bloc à façonner. Si ensuite, renversant l'excentricité des disques, on le fait revenir en déplaçant les disques ainsi que la broche, le tuyau ébauché peut être étiré, en sorte que, par une allée et venue dans le laminoir, on peut

façonner à volonté des tubes, des pièces de toute forme cylindrique massive, ébauchée en creux ou creusée de n'importe quelles dimensions inférieures en section à celle du bloc primitif.

A l'aller, la broche agit par pression; au retour, elle agit par traction.

Pour la fabrication de tuyaux ayant un petit diamètre extérieur et une très grande longueur, le même procédé peut être appliqué avec avantage. Il est possible d'obtenir des tuyaux très longs et à paroi excessivement mince. Ici encore, on peut obtenir la torsion des fibres en rendant inégale la proportion entre le diamètre des cylindres et celui de la pièce à l'entrée et à la sortie, ou encore en employant des pièces dont les fibres sont déjà hélicoïdales.

A épaisseur égale des parois, on obtient une plus grande solidité des tuyaux. Cette torsion est avantageuse pour les tuyaux en fer, les bouilleurs, les canons de fusils, etc. Veut-on étirer les tuyaux sans tordre les fibres, la proportion entre le diamètre des disques et celui de la pièce doit être la même à l'entrée et à la sortie. On évite aussi la trop grande torsion des fibres par la réversibilité ou par un travail égal en avant et en arrière.

Tout étant équilibré, les disques peuvent recevoir une grande vitesse, et l'étirage a lieu en très peu de temps. Comme dans ces procédés, le métal se refroidit peu, depuis le commencement du travail jusqu'à la fin, le travail de laminage, se concentrant sur un espace restreint, il est possible d'obtenir avec de gros blocs et d'une seule chaude, des pièces tubulaires sans soudure à parois minces. On prévoit l'obtention de longs bouilleurs de chaudières, de tubes à canons, d'essieux ou arbres creux, etc.

Si, au lieu d'être ronde, la broche est d'un autre profil enveloppable, on peut obtenir des tuyaux dont les parois sont d'épaisseurs inégales; ils peuvent être courbés sous toutes formes, circulaire, hélicoïdale, spirale.

Ou encore, on produit des poutrelles creuses *(fig. 300)*, des

rails tubulaires *(fig. 301)*, traverses creuses également, billes creuses, etc.

En laminant à chaud des barres de fer ou d'acier, des tubes avec vis d'un pas très développé, et en les soumettant en même temps ou ensuite à un laminage à froid suffisant, on arrive à produire des tuyaux d'une grande élasticité dans le sens de la longueur.

Pour des tuyaux à parois minces, la limite de l'épaisseur de la paroi est donnée par le refroidissement dû à la broche et aux disques. Pour le cuivre et autres métaux malléables à froid, on peut réduire l'épaisseur à volonté.

Par l'emploi de rainures d'étirage avec une inclinaison

Fig. 300.

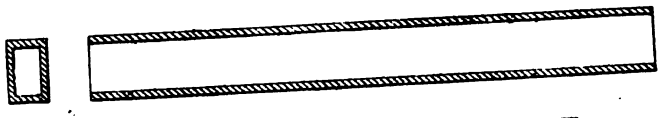
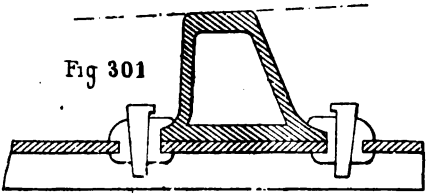


Fig 301

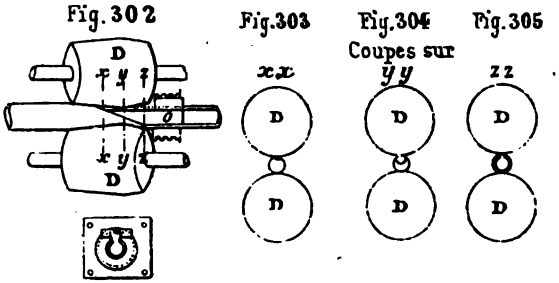


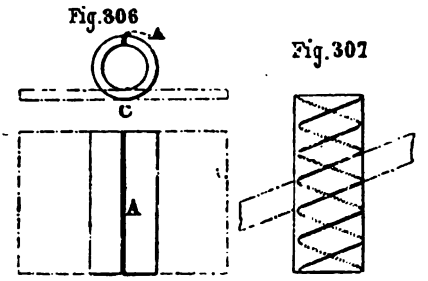
beaucoup plus forte que celle qui correspond à l'introduction du bloc de métal, la matière glisse par-dessus la périphérie, sans étirage du noyau intérieur, et il se forme un tuyau qui reste massif à sa partie postérieure. On peut ainsi produire des tubes Field ou, en découpant le bout plein, on obtient des tubes fabriqués sans broche auxiliaire.

Pour les projectiles, ces tronçons de tubes pleins à un bout font l'objet d'une fabrication spéciale.

Il va sans dire que, pour étirer ces pièces, on peut employer un mandrin de forme correspondante assurant les dimensions exactement.

En appliquant aux disques du trio des collets d'élargissement et en variant le calibre rotatif à l'endroit le plus étroit des disques inférieurs, au lieu de le mettre au milieu des trois, le laminoir devient tréfileur pour étirer des blocs chauffés à blanc et les transformer en fils minces à volonté; ou encore, par l'application d'un calibre façonné, on peut, en laminant par un seul passage des rondins ébauchés chauffés, produire du fil façonné de tout profil.





Avec son laminoir universel muni de galets *(fig. 302)*, M. Mannesmann a obtenu des bandes en transformant un bloc sur un nez tournant avec la pièce, le métal se trouvant transformé en tube non fermé qu'il suffit de développer pour obtenir une bande (1).

Le nez O est enfoncé d'abord latéralement par son extrémité

(1) Brevet du 30 mai 1888.

antérieure pointue, de manière que sous l'action des disques DD, dans le bloc laminé, il se produit en XX la section transversale *(fig. 303)*. Cette section se transforme peu à peu en celle *(fig. 304)* en coupe suivant YY, et *(fig. 305)* en coupe suivant ZZ, et il se produit un tube possédant une fente longitudinale ou hélicoïdale pouvant être transformé en plat par recourbement et par l'opération supplémentaire destinée à régulariser la bande (laminage entre cylindres ordinaires). Ou encore, sur un mandrin et dans le laminoir oblique ou transversal, on produit un tube à paroi mince que l'on fend soit pendant le laminage, dans le laminoir même, et cela entre des couteaux circulaires, ou au moyen d'autres dispositifs tournant d'une vitesse correspondant aux cylindres, par exemple au moyen d'un couteau adapté au mandrin. La fente directe des tubes peut être pratiquée :

1° Parallèlement à leur axe longitudinal *(fig. 306)*, ce qui permet de n'ouvrir les tubes qu'à une seule place en A ou en plusieurs endroits, et dans ce dernier cas, on obtient des bandes étroites ;

2° Si le tube est fendu de façon que la ligne s'étende hélicoïdalement autour de l'axe longitudinal *(fig. 307)*, on obtient des bandes plus étroites et de plus grande longueur que lorsque les tubes sont fendus suivant les génératrices. Ce mode de laminage permet de supprimer l'opération complémentaire de laminage entres cylindres ordinaires. Plus les lignes de section sont rapprochées, plus les bandes sont étroites, de sorte qu'il est possible de produire de la verge plate ou quadrangulaire.

Dans la transformation de ces tubes en bandes, il n'y a pas de déchet. L'une des faces de la bande est absolument exempte de scories et de petits défauts. S'agit-il d'obtenir directement en une seule chaude, des plaques, des disques, on évide l'intérieur du bloc suivant le procédé de laminage oblique, avec ou sans mandrin ; la pièce avance ensuite sur un mandrin conoïde, s'évase intérieurement en s'élargissant ou en se rétrécissant en

même temps à l'extérieur, et l'épaisseur de la paroi diminue jusqu'à ce qu'on ait obtenu l'épaisseur voulue pour la plaque.

Les cylindres ou disques à section parabolique sont mieux appropriés à la transformation des tubes en plaques métalliques de ce genre, que les cylindres en forme de tonnes dont l'application occasionne une rotation des fibres jusqu'à la fin de l'opération.

L'une des faces des disques obtenus provenant des parties intérieures de la masse laminée est complètement indemne de scories, défauts provenant des couches extérieures qui conservent toujours une certaine rugosité et des traces de scorie de réchauffage ou de battitures incrustées.

Pour le filetage, les plateaux peuvent être disposés, comme

Fig. 308 Fig. 309 Fig. 310

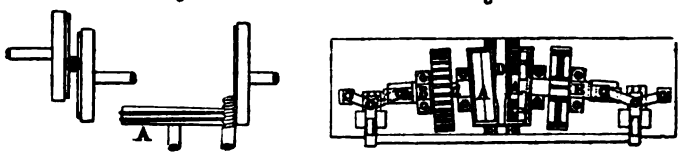


figure 308, à axes parallèles ou, comme *figure 309*, à axes rectangulaires. Dans ce dernier cas, l'empreinte hélicoïdale se trouve sur le pourtour du plateau A.

La *figure 310* se rapporte à la disposition d'un laminoir à disques pour filetage (1).

Sur les disques sont rapportés et fixés par vis, des anneaux évidés AA', présentant des rainures et filets en spirale qui correspondent aux dimensions des filetages à exécuter.

Les disques sont montés sur des arbres BB qui tournent en sens contraire, font un certain angle et peuvent se déplacer longitudinalement à volonté pour éloigner ou rapprocher les outils suivant le diamètre de la pièce.

(1) *Fileteuse Erichson*. Brevet du 11 septembre 1880.

Le déplacement longitudinal de chaque arbre est produit par des leviers articulés formant genouillère.

La pièce, guidée par la douille D, est présentée à l'action des outils qui la roulent et la font avancer en formant les filets de vis.

L'un des plateaux est un peu surélevé par rapport à l'autre et l'inclinaison des filets formés dépend de cette différence de hauteur ou excentricité; plus celle-ci est grande, plus les filets sont inclinés. L'inclinaison devient nulle si les axes géométriques des arbres se trouvent dans le même plan. Dans ce cas, les empreintes des disques produisent des collets et rainures dans la pièce en œuvre.

La forme la plus intéressante obtenue, sans emploi de mandrin auxiliaire, par le laminage hélicoïdal, est la forme creuse de profil de révolution.

Pour se rendre compte de la transformation d'une billette cylindrique pleine en tube, il faut examiner très attentivement les différentes particularités de l'opération, le mode de déplacement du métal, les forces qui le sollicitent, les mouvements relatifs des diverses zones d'action des outils.

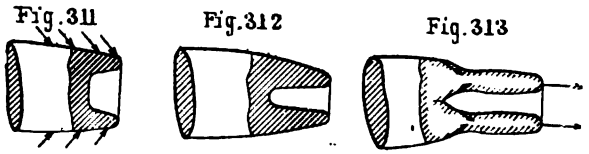
Il faut, pour réussir, un métal très malléable en même temps que très homogène, très ductile et suffisamment tenace à l'étirage. Un métal mou, non ductile, se diviserait, se crique-rait par l'effet du roulage; l'entraînement du métal suivant des hélices ne pourrait se produire.

Lorsque avec un cylindre de plomb, on essaie de façonner au marteau, à une extrémité, une cuvette, il faut déplacer le métal extérieur longitudinalement vers l'un des abouts, sans affecter la partie centrale; il faut opérer par petits coups répétés dirigés, autant qu'il est possible, dans le sens voulu. On arrive assez facilement à former une cuvette *(fig. 311)*, qui a tendance à diminuer de diamètre, la paroi annulaire s'épaississant. En l'état *(fig. 312)*, le noyau ne s'est pas encore allongé, la surface intérieure correspond à la face primitive d'about transformée.

En continuant, on arriverait, non sans difficulté, à former une partie de tube dont le diamètre intérieur serait assez petit et cela, parce que le métal n'étant soumis qu'à des efforts transversaux peu obliques, le tube ne s'étire guère.

Pour mieux assurer la réussite, il faudrait opérer avec mandrin intérieur soutenant la matière, ce qui permettrait l'agrandissement des diamètres intérieur et extérieur. On obtiendrait ainsi une amorce de tube sans pouvoir déterminer l'expansion de la partie centrale.

Mais, si l'on suppose que le métal de l'amorce possède une plus grande ténacité que celui de la partie pleine avoisinant la partie tubulaire, et si cette dernière est soumise à un effort de traction directe, l'allongement se faisant dans le fond de



l'amorce *(fig. 313)*, des efforts obliques se manifesteront ayant une tendance à séparer les fibres du centre; si le métal est ductile, une striction annulaire intérieure et extérieure pourra se produire et le métal s'écouler peu à peu en formant un tube par étirage direct.

Si à cet effet d'étirage s'ajoute celui d'un roulage énergique déterminant, comme nous l'avons vu précédemment, une rupture centrale, cette rupture favorisera la striction intérieure, les fibres se sépareront avec une plus grande facilité. En donnant aux fibres une torsion progressive, on augmentera encore les effets d'étirage et d'écoulement annulaire. Cet écoulement sera surtout favorisé par une rotation rapide développant des actions centrifuges qui pourraient, à elles seules, suffire avec une matière plastique maintenue dans une enveloppe exté-

rieure ou guidée et déplacée par un outil de pression latérale tel que le doigt (1). Ou encore, il se produit un phénomène analogue à celui qui se manifeste quand un liquide contenu dans un vase s'écoule en tourbillonnant à travers un orifice percé dans le fond du vase. La surface du liquide prend la forme d'un entonnoir composé de couches concentriques ayant des vitesses qui s'accroissent progressivement du centre au pourtour.

Le laminage hélicoïdal réalise ces différentes conditions avec un trio de galets de forme hyperbolique dont deux, par exemple, sont à axes parallèles *(fig. 314)* et le troisième à axe oblique.

Au début du laminage l'action est analogue à celle du martelage ou d'une pression latérale oblique, le métal se déplace *(fig. 315)* superficiellement, entraîné par les zones du galet oblique à diamètres croissants qui réduisent le diamètre de la pièce roulée par les galets à axes parallèles.

La réduction de diamètre assure à ce moment une pression suffisante pour développer l'adhérence nécessaire, augmentée aussi par les empreintes en hélice des galets.

De plus, la progression des vitesses due à la progression des diamètres des outils et à la réduction des diamètres de la pièce, a pour effet de déterminer dans les premières zones un roulage et un étirage progressifs. Il se développe donc entre les zones successives des torsions allongeant en hélices toutes les fibres tant intérieures qu'extérieures. Il faut admettre qu'il n'y a pas de glissement, de patinage relatif entre les divers points de contact des galets; c'est une des conditions essentielles, sinon il y aurait roulage simple à vitesses variables.

Puisqu'il y a réduction de diamètre extérieur de la pièce, il y a augmentation de l'épaisseur de la paroi de la cuvette

(1) Avec du mastic de vitrier, on obtient aisément sur le tour toutes formes creuses, le doigt déplaçant la matière par simple pression extérieure ou intérieure. On constate ainsi que, pour un métal résistant, il suffit d'employer de plus grands efforts et une plus grande vitesse de rotation, c'est-à-dire des outils appropriés.

amorcée qui se développe comme l'indiquent les *figures 316* à *318*. A ce moment de la déformation, le roulage a produit son effet de rupture centrale dans une ou plusieurs directions ; la paroi de la cuvette s'est refroidie au contact des outils, sa ténacité a augmenté, les efforts d'étirage peuvent produire la déformation principale vers le fond de la cuvette dont la haute température s'accuse visiblement par un centre lumineux qui éclaire l'intérieur du tube présentant une paroi lisse très uniforme. La vitesse de rotation étant grande, les effets centrifuges concourent à l'expansion des fibres centrales en même temps qu'ils donnent une pression additionnelle sur les galets, pression favorable à l'adhérence. L'étirage avec entraînement des fibres centrales et striction relative se produit alors et le débit du tube prend sa période de régime *(fig. 319* et *320)*.

Si on suppose que l'opération se fasse à petite vitesse, le métal possédant des propriétés constantes analogues à celles du plomb à froid, on ne pourrait obtenir que des tubes de petit diamètre intérieur et d'assez forte épaisseur de paroi ; le noyau serait entraîné par étirage, il n'y aurait aucune force agissant pour renfler la pièce, développer un vide autre que celui déterminé par un roulage prolongé et qui n'est pas comparable à celui obtenu à haute température dans les tubes en acier doux.

Ce n'est qu'en opérant avec une vitesse suffisante pour équilibrer en partie, ou vaincre la résistance moléculaire dans le sens des rayons, que l'on développe la force additionnelle qui nous paraît indispensable lorsqu'on n'emploie pas de mandrin intérieur (1).

---

(1) La théorie de la résistance à l'action centrifuge montre que la tension du centre d'un disque plein de rayon extérieur r est égale à $\frac{13\delta\omega^2 r^2}{32g}$, soit pour une billette de fer de 100mm de diamètre tournant à 3.000 tours par minute, une tension

$$R = \frac{13 \times 7.700}{32 \times 9{,}8}\left(\frac{3{,}14 \times 3.000}{30}\right)^2 0{,}050^2 = 70.000^{kg} \text{ par mètre carré,}$$

ce qui serait insuffisant pour écarter les fibres au blanc. Mais, pour peu que la pièce est évidée par l'action du roulage, la tension au centre est

C'est, d'ailleurs, en augmentant de plus en plus la vitesse de rotation et la célérité du laminage, à cause de la température élevée nécessaire au travail du fer fondu et de l'acier doux, que le procédé a réussi.

Fig. 314

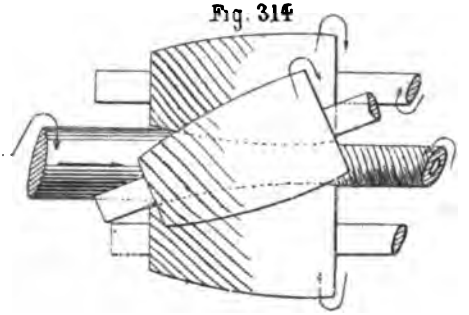


Fig. 315

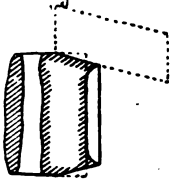


Fig 316

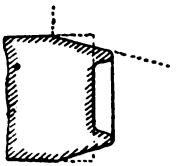


Fig 317

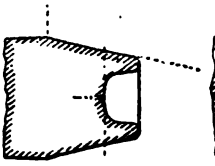


Fig 318

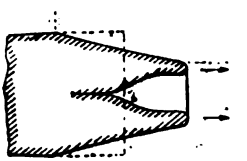


Fig. 319

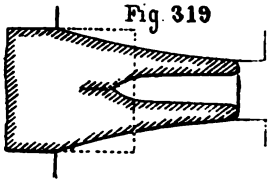
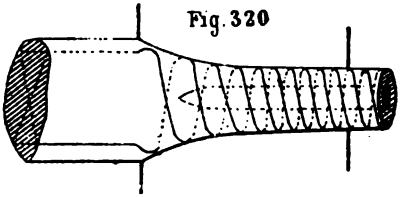


Fig. 320



L'opération dure moins d'une minute et exige une énergie très puissante. Les galets lamineurs pour tubes font de 300 à 600 tours par minute et, suivant le diamètre de la pièce, celle-ci

---

environ trois fois plus forte et prend une valeur égale à

$$\frac{\delta\omega^2r^2}{g} = \frac{7.700}{9{,}8} \times \left(\frac{3{,}14 \times 3.000}{30}\right)^2 \times \overline{0{,}05}^2 = 193.000^{k\text{g}};$$

soit $0^{k\text{g}},2$ par millimètre carré, valeur suffisante pour vaincre la résistance moléculaire du fer ou de l'acier voisin de l'état pâteux.

tourne à la sortie à une vitesse circonférentielle atteignant 30^{m} par seconde, soit pour un tube de 0^{m},10 environ 6.000 tours par minute.

Il suffit de trente secondes pour transformer en un tube, une billette d'acier de 3 à 4^{m} de longueur et de 100^{mm} de diamètre. On évalue l'énergie dépensée à 8.000 et 10.000^{chvx} par seconde selon le diamètre, ce qui nécessite des moteurs de 2.000^{chvx} à volants excessivement puissants (60^{t} et plus) qui tournent à des vitesses tangentielles de 100^{m} par seconde (1).

En considérant la simplicité relative du laminoir hélicoïdal et la multiplicité des produits que l'on peut en obtenir, cet outil mérite bien le titre d'universel.

Il faut cependant noter que, jusqu'à ce jour, il n'a été appliqué industriellement qu'à la fabrication des tuyaux et que l'obtention de tubes achevés directement dans le laminoir est très difficile et très onéreuse. Pour réussir, il a fallu vaincre des difficultés de tout ordre, créer des organes spéciaux, tâtonner pour la détermination des vitesses convenables à donner aux outils qui exigent un ajustage précis et une solidité exceptionnelle, les forces vives développées étant de grande intensité. Il a fallu aux inventeurs une confiance inébranlable dans le succès, pour aboutir en quelques années à une réalisation pratique remarquable à divers points de vue (2).

On a proposé de remplacer les galets lamineurs par des barres prismatiques se croisant sous un angle pouvant varier de 0° à 90° et qui, prenant le bloc de métal, l'un par dessus, l'autre par dessous, tout en étant animées d'un mouvement de va-et-vient très rapide, produisent, pendant la période de tra-

(1) Dans un remarquable mémoire (*Revue industrielle*, 1891), M. Gustave Richard a indiqué les dispositions mécaniques du laminoir Mannesmann.

(2) Il existe actuellement quatre usines à tubes Mannesmann : l'usine mère à Reïmscheid, une à Bons près Saarbruck, une à Landore dans le pays de Galles, une à Komotau en Autriche. Une cinquième usine est installée à Duisbourg, pour la fabrication des tubes en cuivre et en laiton. Il est surprenant de constater la rareté, pour ne pas dire l'absence complète, des produits de ces usines sur les marchés de la métallurgie.

vail, la rotation de la pièce qui se transforme en tube. Les barreaux sont convenablement guidés, la pièce est maintenue contre tout déplacement longitudinal. La réalisation industrielle de ce procédé nous semble bien aléatoire (1).

Les divers procédés de laminage s'appliquent à notre époque à toutes pièces prismatiques ou de révolution, à tous profils pleins ou creux.

Ces procédés sont, sans contredit, ceux de plus grand rendement, et permettent seuls de transformer rapidement et économiquement les produits bruts en produits façonnés, de manière à satisfaire aux besoins des diverses industries modernes.

Le laminage convient tout particulièrement pour la confection des fils, des bandes, des barres, tôles de faible section et de grande longueur.

Aucun autre procédé ne saurait le remplacer, à cause de la célérité nécessaire à l'exécution et de la régularité obtenue.

Le laminage est aussi avantageusement adopté pour les fortes épaisseurs, jusqu'à 1^{m} et plus, telles que celles des lingots pour plaques de blindages qui nécessitent des laminoirs d'une puissance comparable à celle des plus fortes presses, à celle des plus énergiques marteaux-pilons.

(1) Procédé breveté le 17 décembre 1892 par MM. Wüstenhofer et Surman.

CHAPITRE V

I. — Procédés par traction directe.

Une pièce tractionnée s'allongeant, ses dimensions transversales diminuent; il se détermine un étirage de la pièce souvent localisé.

Le procédé de traction directe n'est guère appliqué qu'auxiliairement pour l'étirage proprement dit, parce que *(fig. 321)* l'allongement ne se produit pas uniformément dès que la limite de l'effort de traction maximum est atteinte, et qu'il est difficile de régler cette limite avec la diminution d'épaisseur locale; de plus, le moindre défaut, les criques transversales, surtout, s'agrandissent et déterminent la rupture. Le travail d'étirage étant ainsi plus difficile, on s'en tient au procédé par pression transversale.

Redressage par traction directe.

La traction directe s'applique avantageusement au redressage des fils enroulés en botte, des verges de fer de petite section en opérant à froid.

Il suffit de saisir la pièce par ses extrémités et de la soumettre à une traction voisine de la limite d'élasticité produisant un faible allongement. Ce procédé est aussi employé pour le dressage des tôles minces, au moyen d'une machine spéciale *(fig. 1* et *2, planche XXXVI)* (1).

L'opération se fait sur une douzaine de feuilles à la fois.

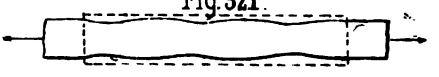
(1) *Engineering*, 2 octobre 1885. Constructeur M. Britton of Claveland, Ohio.

Deux fortes mâchoires saisissent le paquet à chaque bout pour produire la traction suivant la longueur, afin que l'effort soit moins grand qu'en la faisant agir suivant la largeur.

L'une des mâchoires est munie de deux barres d'attache qui permettent de régler sa position suivant la longueur des feuilles.

La deuxième mâchoire est solidaire d'une tige de piston de presse hydraulique mise en pression par deux pompes d'injection actionnées mécaniquement.

Fig. 321.



La traction doit être suffisante pour déterminer un petit allongement des parties qui ne se sont pas bosselées ; les parties bosselées suivent le déplacement et s'effacent.

Cette machine est assez employée en Amérique pour le dressage des tôles minces d'acier doux, de fer fondu, de cuivre, de laiton, de zinc.

Pour obtenir l'effort nécessaire à l'étirage de chacun de ces métaux, il faut introduire dans la formule d'équilibre $P = RS$ (R résistance, S section), la valeur de R qui correspond à l'allongement produit.

Ce procédé a l'inconvénient de faire perdre au métal une partie de sa ductilité.

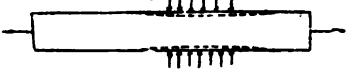
La traction directe est quelquefois appliquée pour l'allongement partiel, restreint, de pièces telles que : bandages de roues, frettes, dont on soumet différentes parties à l'action d'une machine analogue à celle pour refouler.

Traction et compression.

La traction agissant avec des compressions transversales intermittentes *(fig. 322)* à l'aide d'étampes, donnerait de bons résultats pour le travail des lingots ou des grosses pièces de forge. Mais, la difficulté de bien agencer les organes de traction et ceux de compression, est la pierre d'achoppement qui a

fait renoncer jusqu'ici à ce procédé qui utiliserait des efforts agissant directement dans le sens de la plus grande déformation à obtenir. (Nous trouverons ce procédé appliqué à la confection des essieux creux, deuxième partie.)

Fig. 322



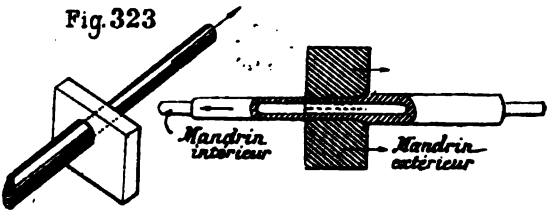
Pour les petites pièces, on applique quelquefois ce procédé au moyen de la machine *(fig. 3, planche XXXVI)* (1) dont les griffes C à hauteur du tas I sont déplacées par deux leviers L actionnés par la vis F solidaire de la manivelle H.

Une pièce étant saisie entre les griffes, et celles-ci s'éloignant l'une de l'autre, déterminent une traction directe dont on règle la valeur à volonté. Pendant l'étirage, on frappe du marteau sur la pièce qui est supposée en fer porté au rouge.

Étirage au mandrin.

La traction combinée avec la compression partielle se retrouve dans l'étirage des fils métalliques, des barres, des tubes, à travers des mandrins dits filières, qui réduisent et calibrent la section suivant une forme déterminée, simple ou moulurée, correspondant à la section de passage du mandrin *(fig. 323)*.

Fig. 323



Lorsqu'il s'agit de fils, le procédé prend le nom de *filage, de tréfilage*; on l'appelle *tirage* ou *étirage*, lorsqu'il s'applique aux barres de tous profils. Pour les barres profilées, tordues et calibrées, le mandrin est de forme emboîtante appropriée.

(1) Machine, ancien modèle, de MM. Sculfort, Malliar et Meurice. Brevet du 21 juin 1875.

Le procédé met en œuvre tous les métaux malléables à froid ou à chaud dans les ateliers appelés *tireries* ou *tréfileries*.

La réduction de la section se fait par de nombreux passages à travers des mandrins de dimensions décroissant progressivement. Quand le procédé s'applique à des tuyaux devant être bien calibrés intérieurement, l'étirage se fait sur mandrin intérieur maintenant le métal, le mandrin extérieur réduisant l'épaisseur de la paroi.

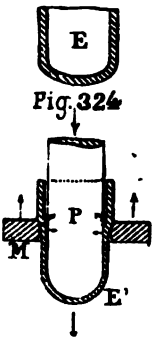


Fig. 324

La compression transversale combinée avec une pression ou poussée longitudinale déterminant une traction sur la pièce est aussi appliquée pour l'étirage des gros et moyens tuyaux sans soudure, des récipients ouverts à une extrémité.

L'ébauche E *(fig. 324)* a la forme d'une cuvette obtenue dans un moule ou par le procédé d'emboutissage. Elle est montée à l'extrémité d'un pousseur de presse P formant mandrin intérieur, qui la pousse à travers un mandrin M ou lunette percée dont le diamètre du trou est plus petit que le diamètre extérieur de l'ébauche, de telle sorte que celle-ci, se réduisant en diamètre et en section, s'allonge, s'étire proportionnellement à la réduction de la section. Lorsqu'il n'y a pas d'inconvénient, on ménage, dans la paroi du fond, un petit trou central que traverse un téton disposé sur l'about du pousseur P, ce qui assure le repérage pour les premiers passages.

L'étirage au mandrin se fait progressivement par plusieurs passages dits traits successifs ou parfois simultanés à travers des lunettes de diamètres décroissants s'il s'agit de tuyaux, de barres rondes ou ovales. Pour des profilés, on opère d'une façon progressive, soit pour obtenir la réduction de la section primitive, soit pour la déformer peu à peu sans réduction sensible de la section, par exemple lorsqu'il s'agit de profiler des bandes de mince épaisseur.

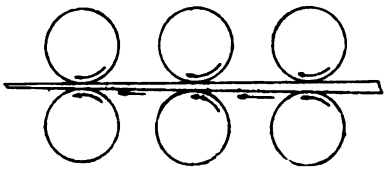
La vitesse varie beaucoup; elle est de quelques centimètres

par minute pour les grosses pièces ; elle est de plusieurs mètres par seconde pour certains fils. Il faut avoir soin de bien lubrifier les parties qui frottent. Un tube de cuivre ou de laiton humecté d'eau ne saurait s'étirer facilement à la filière ; après le recuit suivi de trempe dans un bain d'eau, il faut avoir soin de sécher.

Étirage et laminage simultanés.

La traction combinée avec le laminage est utilisée dans quelques cas particuliers de laminage continu *(fig. 325)*, lorsque la pièce suit toujours la même direction en passant dans plusieurs laminoirs successifs rapprochés. On peut régler le débit de deux laminoirs adjacents de manière à déterminer une certaine traction sur la pièce produisant un allongement voulu.

Fig.325



Comme cet allongement de traction ne saurait être prononcé, autrement l'effort de traction serait grand et les cylindres glisseraient sur la pièce, la pratique préfère ne pas étirer par ce procédé ; elle cherche simplement à obtenir, au plus près, une traction maintenant la pièce droite.

Mais, lorsque les cylindres sont libres de tourner, c'est-à-dire ne sont pas commandés par des engrenages, l'effort-moteur P s'exerçant sur la pièce tirée, le procédé est plus avantageux que celui au mandrin. Dans ce dernier, le frottement de la pièce dans le mandrin est toujours très grand, tandis qu'avec des cylindres la résistance de roulement de la pièce et de glissement des tourillons est beaucoup moins importante.

Ce procédé devrait toujours être appliqué pour le dégrossissage et le mandrin réservé pour le calibrage final.

Bancs à tirer ou à étirer.

Le procédé de tirage direct à travers un mandrin est appliqué depuis longtemps aux fils, aux bandes et aux petites barres. Les machines avec lesquelles on opère s'appellent des bancs à tirer.

La *figure 4, planche XXXVI* (1), se rapporte à un ancien modèle pour l'étirage des fils; le banc s'appelait *bobille*; la filière était la *buche à dégrossir*.

La botte était montée sur un dévidoir D; la filière F était maintenue contre un taquet et un support; le fil était tiré en s'enroulant sur la bobine B actionnée à la main par manivelle. L'ouvrier se servait soit du marteau et du tas, soit de la lime pour appointir le fil, le passer dans la filière, puis le tirer avec une petite pince sur une longueur suffisante pour l'attacher à la bobine.

Il est à présumer que l'application de l'étirage aux bandes minces fut motivée par la construction des ressorts, en vue d'obtenir une plus grande régularité qu'avec le martelage ou le laminage. Au XVe siècle, Léonard de Vinci imaginait la disposition d'un banc à tirer représenté *figure 5*. La bande métallique, saisie par les pinces, est tirée à travers un coin par une corde passant sur une poulie de renvoi placée à l'extrémité du banc opposée au mécanisme de commande. La corde est ramenée sur une poulie actionnée par une roue dentée engrenant avec un pignon dont l'arbre est manœuvré par une manivelle à main (2).

Les barres telles que tringles d'espagnolettes se tiraient au moulinet *(fig. 6)* (3) actionné par plusieurs hommes. Les tuyaux faits dans les chaudronneries sont étirés avec le banc *(fig. 7)*; dans les grands ateliers de fabrication courante, dans

(1) Figures extraites de l'*Encyclopédie*.

(2) *Engineering*, 5 mars 1875.

(3) Figures extraites de l'*Encyclopédie*.

les tuberies, on emploie des bancs puissants que nous indiquerons plus loin. Pour le façonnage transversal en moulures des bandes minces, le banc affecte la disposition de la *figure 8*.

Pression et travail d'étirage.

L'opération d'étirage de fils, de barres cylindriques ou de tuyaux étant relativement simple, on peut estimer avec une certaine approximation les pressions qui se développent au contact de la pièce et de l'outil, l'effort de traction nécessaire et l'énergie dépensée.

Le mandrin *(fig. 326)* est ordinairement de section à bord arrondi du côté de l'entrée; il est cylindrique du côté de la sortie ou arrondi également, mais rarement conique pour éviter le grand frottement qui se développerait sur la surface conique.

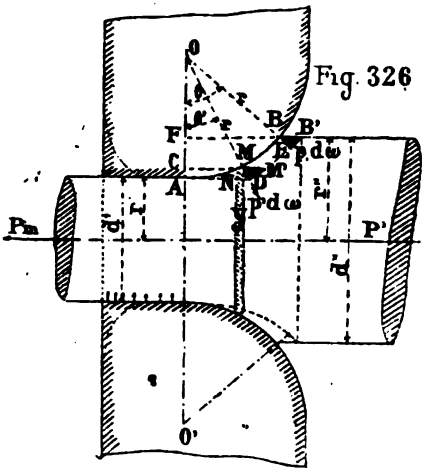


Fig. 326

La traction motrice P*m* équilibre les réactions ou pressions normales qui s'exercent sur l'outil et les frottements de ces pressions.

Les réactions dans la partie cylindrique du mandrin sont dues à l'élasticité du métal; comme elles sont normales à l'axe, elles n'ont pas de composantes horizontales; elles déterminent simplement un frottement. Ces réactions élastiques sont en partie détruites par la traction qui s'exerce sur la pièce et qui tend à réduire le diamètre extérieur par allongement de traction directe, et lorsqu'on opère à chaud, la contraction

due au refroidissement abaisse également l'intensité de ces réactions.

Toutes les réactions étant symétriques par rapport à l'axe de la pièce et du mandrin, elles donnent une résultante P′ dirigée suivant cet axe.

Considérons une réaction élémentaire $p'd\omega$ appliquée au point M de l'arc AB de la surface de contact. Supposons un déplacement très petit du mandrin, tel que le point M soit venu en M′, le point B en B′. Les projections de ces déplacements sur les directions normales à l'arc seront proportionnelles aux intensités des réactions en chaque point considéré à une constante près dont la valeur sera négligée (1). Ainsi, pour le point M, la réaction $p'd\omega$ serait proportionnelle à MD, et si $p_1 d\omega$ est la réaction au point B, on peut poser

$$\frac{p'd\omega}{p_1 d\omega} = \frac{MD}{BE}.$$

Mais $\dfrac{MD}{MC} = \dfrac{MM'}{OM}$ et $\dfrac{BE}{BF} = \dfrac{BB'}{OB} = \dfrac{MM'}{OM}$;

donc $$\frac{MD}{MC} = \frac{BE}{BF};$$

ou encore $$\frac{MD}{BE} = \frac{MC}{BF} = \frac{\sin\theta'}{\sin\theta} = \frac{p'}{p_1},$$

c'est-à-dire que les réactions sont proportionnelles aux sinus des angles θ' et θ.

Lorsque ces angles sont petits, on peut poser aussi

$$\frac{p'}{p_1} = \frac{AM}{AB}.$$

Il faut d'abord estimer la somme des réactions en fonction des données : r rayon de raccord du mandrin, r' rayon minimum de l'ouverture, r'' rayon maximum d'appui du métal correspondant à l'angle θ de l'arc de contact.

(1) La valeur de cette constante serait celle correspondant à la réaction due à l'élasticité du métal. Ce serait la valeur attribuée aux réactions qui s'exerceraient sur la partie cylindrique du mandrin.

Considérons un élément MN de l'arc qui correspond à une surface tronconique de contact, de rayon moyen y et de valeur

$$dS = 2\pi y.MN = 2\pi(r' + r - r\cos\theta')rd\theta'.$$

La pression par unité de surface considérée étant

$$p' = \frac{p_1 \sin\theta'}{\sin\theta} = p\sin\theta';$$

en faisant $$p = \frac{p_1}{\sin\theta},$$

soit $$p_1 = p\sin\theta,$$

les pressions sur dS seront

$$2\pi p(r' + r - r\cos\theta')r\sin\theta' d\theta',$$

soit $$2\pi r^2 p(1 - \cos\theta')\sin\theta' d\theta' + 2\pi rr' p\sin\theta' d\theta'.$$

La pression totale P sera obtenue en faisant la somme des pressions élémentaires de 0 à θ, soit

$$P = 2\pi r^2 p\int_0^\theta (1 - \cos\theta')\sin\theta' d\theta' + 2\pi rr' p\int_0^\theta \sin\theta' d\theta',$$

$$P = (2\pi r^2 p + 2\pi rr' p)\int_0^\theta \sin\theta' d\theta' - 2\pi r^2 p\int_0^\theta \cos\theta'\sin\theta' d\theta',$$

$$P = 2\pi rp(r + r')\int_0^\theta \sin\theta' d\theta' - 2\pi r^2 p\int_0^\theta \cos\theta'\sin\theta' d\theta'.$$

Or, on a

$$\int_0^\theta \sin\theta' d\theta' = (-\cos\theta)_0^\theta = -\cos\theta - (-1) = 1 - \cos\theta$$

$$= 2\sin^2\frac{\theta}{2}$$

et $$\int_0^\theta \cos\theta'\sin\theta' d\theta' = \frac{\sin^2\theta}{2}.$$

Il vient

$$P = 2\pi rp(r + r')(1 - \cos\theta) - \pi r^2 p\sin^2\theta,$$

$$P = 2\pi rp\left[(r + r')2\sin^2\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2}r\sin^2\theta\right],$$

$$P = 2\pi rp\left[2(r + r')\sin^2\frac{\theta}{2} - \frac{4r\cos^2\frac{\theta}{2}\sin^2\frac{\theta}{2}}{2}\right],$$

$$P = 4\pi rp \sin^2\frac{\theta}{2}\left[(r + r') - r\cos^2\frac{\theta}{2}\right]$$

$$P = 4\pi rp \sin^2\frac{\theta}{2}\left[r\left(1 - \cos^2\frac{\theta}{2}\right) + r'\right],$$

$$P = 4\pi rp \sin^2\frac{\theta}{2}\left(r\sin^2\frac{\theta}{2} + r'\right).$$

En fonction de la réduction $r' - r'$ la valeur de P prend la forme

$$P = 2\pi p(r + r')r(1 - \cos\theta) - \pi r^2 p \sin^2\theta,$$

$$P = 2\pi p(r + r')(r'' - r') - \pi r^2 p \sin^2\theta,$$

$$P = 2\pi p\left[(r + r')(r'' - r') - \frac{1}{2}r^2\sin^2\theta\right].$$

Si on connaît $p_1 = p\sin\theta$,

d'où $p = \dfrac{p_1}{\sin\theta}$,

il vient

$$P = \frac{2\pi p_1}{\sin\theta}\left[(r + r')(r'' - r') - \frac{1}{2}r^2\sin^2\theta\right].$$

Ces relations montrent que, pour une même réduction de diamètre, la pression totale P est d'autant plus élevée que le rayon de raccord est plus grand, ce qui a été aussi reconnu pour les diamètres des cylindres de laminage avec lesquels le mandrin d'étirage a une certaine analogie d'action.

Cette pression dépend aussi directement de la pression élémentaire p, c'est-à-dire de la résistance du métal.

On conçoit aisément qu'elle varie aussi avec le diamètre d' et avec la différence $d'' - d'$.

Projection des pressions sur l'axe d'étirage.

Les pressions dont la somme est P sont obliques à l'axe du mandrin et donnent lieu à une résultante ou à une somme de projections P′ suivant cet axe, qu'il faut évaluer pour faire entrer dans la relation d'équilibre.

Il faut considérer, de nouveau, la surface élémentaire du

tronc de cône de contact correspondant à l'arc MN et multiplier les pressions élémentaires qui s'exercent sur cette surface par $\sin\theta'$.

La somme des pressions sur la surface élémentaire était

$$2\pi r'^2 p(1-\cos\theta')\sin\theta' d\theta' + 2\pi r r' p \sin\theta' d\theta'.$$

Sa projection sur l'axe serait

$$2\pi r'^2 p(1-\cos\theta')\sin^2\theta' d\theta' + 2\pi r r' p \sin^2\theta' d\theta'.$$

Nous devons faire la somme de ces projections de O à θ pour obtenir P'.

Il vient

$$P' = 2\pi r'^2 p \int_0^\theta (1-\cos\theta')\sin^2\theta' d\theta' + 2\pi r r' p \int_0^\theta \sin^2\theta' d\theta';$$

$$P' = (2\pi r'^2 p + 2\pi r r' p)\int_0^\theta \sin^2\theta' d\theta' - 2\pi r'^2 p \int_0^\theta \sin^2\theta' \cos\theta' d\theta';$$

$$P' = 2\pi r p(r + r')\int_0^\theta \sin^2\theta' d\theta' - 2\pi r'^2 p \int_0^\theta \sin^2\theta' \cos\theta' d\theta';$$

or, on a $\int_0^\theta \sin^2\theta' d\theta' = \frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}$ (1).

Calculons, d'autre part, $\int \sin^2\theta' \cos\theta' d\theta'$.

Intégrons par parties en faisant

$$u = \sin^2\theta' \qquad dv = \cos\theta' d\theta';$$

on a $$\int u dv = uv - \int v du$$

ou $$\int \sin^2\theta' \cos\theta' d\theta' = \sin^2\theta' - \int \sin\theta' 2\sin\theta'\cos\theta' d\theta',$$

soit $$3\int \sin^2\theta' \cos\theta' d\theta' = \sin^3\theta',$$

ou $$\int \sin^2\theta' \cos\theta' d\theta' = \frac{\sin^3\theta'}{3}$$

et $$\int_0 \sin^2\theta' \cos\theta' d\theta' = \left(\frac{\sin^3\theta}{3}\right)_0^\theta = \frac{\sin^3\theta}{3} - \frac{\sin^3 0}{3} = \frac{\sin^3\theta}{3}.$$

(1) $$\int_0^\theta \sin^2\theta' d\theta' = \frac{1}{2}\int_0^\theta (1-\cos 2\theta') d\theta' = \frac{1}{2}\int_0^\theta d\theta' - \frac{1}{2}\int_0^\theta \cos 2\theta' d\theta'$$
$$= \frac{1}{2}\theta - \frac{1}{4}\sin 2\theta = \frac{1}{4}(2\theta - \sin 2\theta).$$

Donc :

$$P' = 2\pi rp\,(r + r')\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}\right) - 2\pi r^2 p\,\frac{\sin^3\theta}{0};$$

$$P' = 2\pi rp\left[(r + r')\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}\right) - \frac{r\sin^3\theta}{3}\right];$$

$$P' = \pi rp\left[(r + r')\,(\theta - \sin\theta\cos\theta) - \frac{2}{3}\,r\sin^3\theta\right];$$

remplaçant $r + r'$ par sa valeur en fonction des diamètres d' et d'' de la pièce, soit

$$(r + r') = r\cos\theta + r'' - r' + r = r\cos\theta + \frac{d'' - d'}{2} + \frac{d'}{2};$$

il vient

$$P' = 2\pi rp\left[\left(\frac{d'' - d'}{2} + \frac{d'}{2} + r\cos\theta\right)\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}\right) - \frac{r\sin^3\theta}{3}\right];$$

$$P' = \pi rp\left[\left((d'' - d') + d' + 2r\cos\theta\right)\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}\right) - \frac{r\sin^3\theta}{3}\right].$$

Si on connaît la pression $p_1 = p\sin\theta$, la relation devient

$$P' = \frac{\pi rp_1}{\sin\theta}\left[(d'' - d') + (d' + 2r\cos\theta)\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}\right) - \frac{r\sin^3\theta}{3}\right];$$

$$P' = \frac{\pi rp_1}{\sin\theta}\left[\left((d'' - d') + d' + 2r\cos\theta\right)\left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin\theta\cos\theta}{2}\right) - \frac{r\sin^3\theta}{3}\right].$$

Frottement sur le raccord du mandrin.

Le frottement F sur les surfaces de contact du mandrin sera obtenu en multipliant la valeur de P par le coefficient du frottement f, soit

$$F = Pf = 2\pi pf[(r + r')\,(r'' - r') - \frac{1}{2}\,r^2\sin^2\theta],$$

ou encore

$$F = Pf = \frac{2\pi p_1 f}{\sin\theta}\,[(r + r')\,(r'' - r') - \frac{1}{2}\,r^2\sin^2\theta].$$

Ce frottement total est distribué de la même manière que les réactions sur la surface de contact, et, ici encore, pour obtenir les projections des frottements sur l'axe, il faut considérer ceux qui s'exercent sur l'élément de surface qui correspond à l'arc MN.

Reprenant la valeur des pressions sur la surface élémentaire

$$2\pi r^2 p\,(1 - \cos\theta')\sin\theta' d\theta' + 2\pi r r' p \sin\theta' d\theta',$$

le frottement dû à ces pressions sera

$$2\pi r^2 pf\,(1 - \cos\theta')\sin\theta' d\theta' + 2\pi r r' pf \sin\theta' d\theta';$$

la projection de ce frottement sur l'axe sera

$$2\pi r^2 pf \cos\theta'\,(1 - \cos\theta')\sin\theta' d\theta' + 2\pi r r' pf \cos\theta' \sin\theta' d\theta'.$$

La projection du frottement total sera la somme des projections précédentes de 0 à θ, soit

$$F' = 2\pi r^2 pf \int_0^{\theta} (1 - \theta')\sin\theta' \cos\theta' d\theta' + 2\pi r r' pf \int_0^{\theta} \sin\theta' \cos\theta' d\theta'$$

$$F' = 2\pi r pf (r + r') \int_0^{\theta} \sin\theta' \cos\theta' d\theta' - 2\pi r^2 pf \int_0^{\theta} \cos^2\theta' \sin\theta' d\theta'.$$

On a : $$\int_0^{\theta} \sin\theta' \cos\theta' d\theta' = \frac{\sin^2\theta}{2}.$$

Calculons $$\int \cos^2\theta' \sin\theta' d\theta'.$$

Intégrant par parties en posant :

$$u = \cos^2\theta' \qquad dv = \sin\theta' d\theta'.$$

On a $$\int u dv = uv - \int v du,$$

soit :

$$\int \cos^2\theta' \sin\theta' d\theta' = -\cos^3\theta' - \int (-\cos\theta')(-2\sin\theta'\cos\theta') d\theta',$$

ou $$\int \cos^2\theta' \sin\theta' d\theta' = -\cos^3\theta' - \int 2\cos^2\theta' \sin\theta' d\theta',$$

$$3\int \cos^2\theta' \sin\theta' d\theta' = -\cos^3\theta',$$

$$\int \cos^2\theta' \sin\theta' d\theta' = \frac{-\cos^3\theta'}{3},$$

et $$\int_0^{\theta} \cos^2\theta' \sin\theta' d\theta' = \frac{-\cos^3\theta}{3} - \left(\frac{-\cos^3\theta}{3}\right) = \frac{1 - \cos^3\theta}{3}.$$

Il vient :

$$F' = 2\pi r pf (r + r') \frac{\sin^2\theta}{2} - 2\pi r^2 pf \left(\frac{1 - \cos^3\theta}{3}\right),$$

$$F' = \pi rpf(r + r')\sin^2\theta + \frac{2}{3}\pi r^2 pf\cos^3\theta - \frac{2\pi r^3 pf}{3},$$

$$F' = \pi rpf\left[(r + r')\sin^2\theta + \frac{2}{3}r\cos^3\theta - \frac{2r}{3}\right],$$

ou encore

$$F' = \pi rpf\left[\left(\frac{d'' - d'}{2} + \frac{d'}{2} + r\cos\theta\right)\sin^2\theta + \frac{2}{3}r\cos^3\theta - \frac{2r}{3}\right],$$

$$F' = \frac{\pi rp_1 f}{\sin\theta}\left[\left(\frac{d'' - d'}{2} + \frac{d'}{2} + r\cos\theta\right)\sin^2\theta + \frac{2}{3}r\cos^3\theta - \frac{2r}{3}\right].$$

Dans l'hypothèse d'une pression additionnelle, due à l'élasticité de la matière, s'exerçant sur le raccord avec une intensité constante p'', il faudrait ajouter aux valeurs précédentes, les valeurs correspondantes à chacune d'elles, que nous allons déterminer.

Dans ce cas on peut poser : $p' = p'' + p\sin\theta'$, et il suffit de rechercher les relations relatives à p'', celles relatives à $p\sin\theta'$ étant connues déjà.

Les pressions normales au raccord seront, sur un élément annulaire de la surface :

$$2\pi p''(r' + r - r\cos\theta')rd\theta'.$$

Sur la surface correspondant à l'angle θ, elles seront :

$$P_1 = 2\pi p'' r^2\int_0^{\theta}(1 - \cos\theta')d\theta' + 2\pi p'' rr'\int_0^{\theta}d\theta',$$

$$P_1 = (2\pi r^2 p'' + 2\pi rr'p'')\int_0^{\theta}d\theta' = 2\pi p'' r^2\int_0^{\theta}\cos\theta' d\theta',$$

$$P_1 = 2\pi rp''(r + r')\int_0^{\theta}d\theta - 2\pi r^2 p''\int_0^{\theta}\cos\theta' d\theta',$$

$$P_1 = 2\pi rp''(r + r')\theta - 2\pi r^2 p''(\sin\theta')_0^{\theta},$$

$$P_1 = 2\pi p''[(r + r')r\theta - r^2\sin\theta)].$$

La pression totale sur le raccord serait :

$$P + P_1 = 4\pi rp\sin^2\frac{\theta}{2}\left(r\sin^2\frac{\theta}{2} + r'\right) + 2\pi p''[(r + r')r\theta - r^2\sin\theta].$$

Les projections des pressions P_1 sur l'axe d'étirage seront :

$$P'_1 = 2\pi r^2 p'' \int_0^\theta (1 - \cos\theta') \sin\theta' d\theta' + 2\pi r r' p'' \int_0^\theta \sin\theta' d'\theta,$$

$$P'_1 = (2\pi r^2 p'' + 2\pi r r' p'') \int_0^\theta \sin\theta' d\theta' - 2\pi r^2 p'' \int_0^\theta \sin\theta' \cos\theta' d\theta',$$

$$P'_1 = 2\pi r p''(r + r') \int_0^\theta \sin\theta' d'\theta - 2\pi r^2 p'' \int_0^\theta \sin\theta' \cos\theta' d\theta'.$$

On a $\int_0^\theta \sin\theta' d\theta' = (-\cos\theta')_0^\theta = -\cos\theta - (-1) = 1 - \cos\theta,$

$$\int_0^\theta \sin\theta' \cos\theta' d\theta' = \frac{\sin^2\theta}{2},$$

soit $P'_1 = 2\pi r p''(r + r')(1 - \cos\theta) - 2\pi r^2 p''\left(\frac{\sin^2\theta}{2}\right),$

$$P'_1 = 2\pi r p''\left[(r + r')2\sin^2\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} r \sin^2\theta\right],$$

$$P'_1 = 4\pi r p'' \sin^2\frac{\theta}{2}\left(r \sin^2\frac{\theta}{2} + r'\right).$$

Ou encore, en fonction de $r'' - r'$,

$$P'_1 = 2\pi p''(r + r') r(1 - \cos\theta) - \pi r^2 p'' \sin^2\theta,$$

$$P'_1 = 2\pi p''\left[(r + r')(r'' - r') - \frac{1}{2} r^2 \sin^2\theta\right].$$

La somme totale des projections serait donc :

$$P' + P'_1 = \pi r p\left[(r + r')(\theta - \sin\theta\cos\theta) - \frac{2}{3} r \sin^3\theta\right] + 4\pi r p'' \sin^2\frac{\theta}{2}\left(r \sin^2\frac{\theta}{2} + r'\right).$$

Le frottement dû aux pressions p'' sera :

$$F_1 = P_1 f - 2\pi p'' f[(r + r') r\theta - r^2 \sin\theta)].$$

Le frottement total sera :

$$F + F_1 = Pf + P_1 f = (P + P_1) f.$$

Les projections du frottement F_1 seront :

$$F'_1 = 2\pi r^2 p'' f \int_0^{\theta} (1 - \cos\theta') \cos\theta' d\theta' + 2\pi p'' r r' f \int_0^{\theta} \cos\theta' d\theta,$$

$$F'_1 = 2\pi r p'' f (r + r') \int_0^{\theta} \cos\theta' d\theta' - 2\pi r^2 p'' f \int_0^{\theta} \cos^2\theta' d\theta',$$

$$F'_1 = 2\pi r p'' f (r + r') \sin\theta - 2\pi r^2 p'' f \left(\frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4}\right),$$

Les projections totales des frottements seront :

$$F' + F'_1 = \pi r p f \left[(r + r')\sin^2\theta + \frac{2}{3} r \cos^2\theta - \frac{2r}{3}\right] + 2\pi r p'' f \left[(r + r')\sin\theta - r\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4}\right)\right].$$

Le mandrin comporte toujours une partie cylindrique, à la suite du raccord. Il s'exerce sur la surface une pression due à l'élasticité de la matière qui, fortement comprimée à l'entrée, tend à reprendre un diamètre légèrement plus grand que celui du mandrin. On peut admettre la même valeur p'' pour la pression par unité superficielle, et h étant la hauteur de la surface cylindrique de diamètre $d' = 2r'$.

Les pressions totales sur cette surface seront

$$P'' = \pi d' h p'' = 2\pi r' h p''.$$

Nous avons déjà signalé que ces pressions étant normales à l'axe, leurs projections sont nulles et n'entrent pas dans la relation d'équilibre.

Le frottement de ces pressions est :

$$F'' = P'' f = \pi d' h p'' f = 2\pi r' h p'' f.$$

Ce frottement se projette avec sa valeur puisqu'il est parallèle à l'axe du mandrin.

L'effort moteur Pm dirigé également suivant l'axe du mandrin se projette sur cet axe en grandeur, de sorte que la rela-

tion générale d'équilibre entre les réactions, les frottements et l'effet moteur ou d'étirage Pm est (1)

$$Pm = P' + P'_1 + F' + F'_1 + F''.$$

$$= \pi rp\left[(r + r')\left(\theta - \sin\theta\cos\theta - \frac{2}{3}r\sin^3\theta\right)\right]$$

$$+ 4\pi rp''\sin^2\frac{\theta}{2}\left(r\sin^2\frac{\theta}{2} + r'\right)$$

$$+ \pi rpf\left[(r + r')\left(\sin^2\theta + \frac{2}{3}r\cos^3\theta - \frac{2r}{3}\right)\right]$$

$$+ 2\pi rp''f\left[(r + r')\sin\theta - r\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4}\right)\right]$$

$$+ 2\pi r'hp''f.$$

Les valeurs à attribuer à $p = p_1 \sin\theta$ et à p'' doivent être déduites d'essais directs de compression à différentes vitesses, et dans des conditions analogues à celles que présente l'étirage, ce qui est difficile à réaliser. Il faut se contenter de rechercher, avec les formules, les valeurs moyennes à attribuer à p et p'', en considérant les efforts Pm obtenus dans les essais d'étirage.

Travail d'étirage. — L'effort Pm se déplaçant sur sa direction, le travail d'étirage à la vitesse V est évidemment $T = Pm \times V$.

Application. — Une application fera ressortir l'importance relative des termes de la relation d'équilibre. Supposons qu'il s'agisse d'étirer un métal donnant lieu à une pression maximum p, égale à 60^{kg} par millimètre carré, comprenant une réaction

(1) Nous avons essayé de calculer cette relation par des formules élémentaires, mais les développements étaient beaucoup plus grands et moins clairs que ceux de la méthode directe suivie.

Il ne faut pas perdre de vue que la surface de contact est à double courbure, et que des relations élémentaires sont difficilement applicables. Ce problème avait, de plus, un caractère de nouveauté (pour nous, du moins qui ne l'avons vu traiter nulle part) et nous avons tenu à l'exposer et à le résoudre au plus près. Or, pour peu que l'on veuille traiter une question de travail d'outil, on est conduit à résoudre un ou plusieurs problèmes complexes qui conduisent à des développements plus étendus qu'on ne le voudrait.

élastique constante $p'' = 10^{kg}$, et une réaction maximum de compression $p \sin\theta = 50^{kg}$, soit :

$$p_1 = p'' + p \sin\theta = 10 + 50 = 60^{kg},$$

d'où $$p = \frac{p_1 - p''}{\sin\theta} = \frac{60 - 10}{\sin\theta} = \frac{50}{\sin\theta}.$$

Les autres éléments étant

$$r' = 50^{mm} \qquad r'' = 55^{mm} \qquad r = 15 \qquad r'' - r' = 5$$

$$h = 60^{mm} \qquad f = 0{,}15,$$

$$r\cos\theta = r - (r'' - r') = 15 - 5 = 10$$

$$\cos\theta = \frac{10}{15} = 0{,}666, \quad \theta = 48°20', \quad 2\theta = 96°40, \quad \frac{\theta}{2} = 24°10,$$

$$\cos^2\theta = 0{,}444 \qquad \cos^3\theta = 0{,}295$$

$$\sin\theta = 0{,}75, \qquad \sin^2\theta = 0{,}56, \qquad \sin^3\theta = 0{,}42,$$

$$\text{arc } \theta = \frac{2 \times 3{,}14 \times 48°20}{360} = 0{,}81$$

$$\sin^2\frac{\theta}{2} = \overline{0{,}41}^2 = 0{,}168,$$

$$\sin 2\theta = \sin 96°40' = 0{,}98.$$

La somme des réactions ou pressions sur le raccord dues à p sera :

$$P = 4\pi r p \sin^2\frac{\theta}{2}\left(r\sin^2\frac{\theta}{2} + r'\right)$$

$$= 4 \times 3{,}14 \times 15 \frac{50}{0{,}75} \times 0{,}168(15 \times 0{,}168 + 50) = 108.200^{kg}.$$

Les pressions sur le raccord dues à l'élasticité p'' seront :

$$P_1 = 2\pi p''\left((r + r')r\theta - (r^2\sin\theta)\right) = 2 \times 3{,}14 \times 10$$
$$\left((15 + 50)15 \times 0{,}81 - (\overline{15^2} \times 0{,}75)\right) = 37.700^{kg}.$$

Pression totale sur le raccord

$$P + P_1 = 145.900^{kg}.$$

Les projections de ces pressions seraient :

$$P' = \pi r p\left[(r+r')(\theta - \sin\theta\cos\theta) - \left(\frac{2}{3}r\sin^2\theta\right)\right] = 3{,}14\times 15\times\frac{50}{0{,}75}$$

$$\left[(15+50)(0{,}81-0{,}75\times 0{,}666) - \left(\frac{2\times 15\times 0{,}42}{3}\right)\right] = 50.000^{kg}$$

et

$$P'_1 = 4\pi r p'' \sin^2\frac{\theta}{2}\left(r\sin^2\frac{\theta}{2} + r'\right)$$

$$= 4\times 3{,}14\times 15\times 10\times 0{,}168(15\times 0{,}168 + 50) = 16.600^{kg}.$$

Les frottements auraient pour valeurs respectives :

$$F = Pf = 108.200 \times 0{,}15 = 16.230^{kg}$$
$$F_1 = P_1 f = 37.700 \times 0{,}15 = 5.655^{kg}$$
$$\text{soit } F + F_1 = 21.885^{kg}$$

Les projections de ces frottements donnent :

$$F'' = \pi r p f\left[(r + r')\sin^2\theta + \left(\frac{2}{3}r\cos^3\theta_1 - \frac{2r}{3}\right)\right] = 3{,}14 \times 15$$

$$\times\frac{50}{0{,}75}\times 0{,}15\left[(65)0{,}56 + \left(\frac{2\times 15\times 0{,}295}{3} - \frac{2\times 15}{3}\right)\right] = 13.820^{kg}$$

$$F' = 2\pi r p'' f\left[(r + r')\sin\theta - r\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4}\right)\right]$$

$$= 2\times 3{,}14\times 15\times 10\times 0{,}15\left[(65\times 0{,}75) - 15\left(\frac{0{,}81}{2} + \frac{0{,}98}{4}\right)\right]$$

$$= 1.413 \times 32{,}5 = 45.922^{kg}.$$

Les pressions sur la partie cylindrique du mandrin auraient pour valeur totale :

$$P'' = 2\pi r' h p'' = 2 \times 3{,}14 \times 50 \times 60 \times 10 = 188.400^{kg}.$$

Ce chiffre montre bien l'importance de cette pression, qui croît avec la longueur h de la partie cylindrique du mandrin. Il convient donc de la tenir aussi courte que possible.

Le frottement dû à cette pression est

$$F'' = 2\pi r' h p'' f = 188.400 \times 0{,}15 = 28.260^{kg}.$$

La traction motrice serait donc

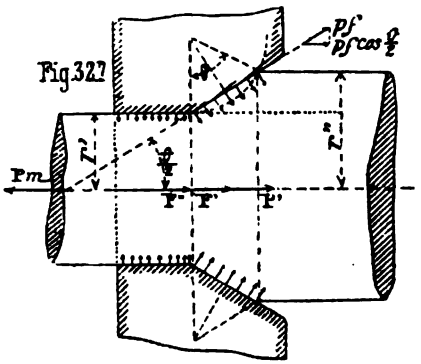
$$P_m = 50.000 + 16.600 + 13.820 + 45.922 + 28.260 = 154.602^{kg}.$$

Le travail à la vitesse de 0,040 par seconde serait

$$T = 154.602 \times 0{,}040 = 6.104 \quad \text{soit} \quad = 6.200^{kgm}.$$

On voit, par cet exemple, que l'étirage des métaux nécessite des efforts considérables de traction et un travail excessif.

Fig 327



La tige étant tractionnée sur une section de rayon $r' = 50^{mm}$, devrait subir un effort par millimètre carré s'élevant à

$$R = \frac{P_m}{S} = \frac{P_m}{\pi r'^2} = \frac{154.602}{3{,}14 \times \overline{50}^2} = 19^{kg},6.$$

Notons qu'une réduction de 10^{mm} sur un diamètre de 110^{mm} ne saurait être obtenue qu'à chaud et que la valeur de R, trop élevée, déterminerait la rupture de la tige.

Lorsque la réduction de diamètre $d'' - d'$ est faible et que l'arc de contact peut être considéré comme remplacé par sa corde faisant un angle $\frac{\theta}{2}$ avec l'axe du mandrin *(fig. 327)*, on peut déduire les relations simples suivantes :

Surface de contact $= \pi(r' + r'')l$ (l longueur de la corde)

$$l = \frac{r'' - r'}{\sin \frac{\theta}{2}}.$$

La pression normale par unité superficielle tend à s'égaliser et à prendre une valeur p, moyenne donnant une pression totale

$$P = \pi(r' + r'')\,lp = \frac{\pi(r' + r'')(r'' - r')}{\sin\frac{\theta}{2}}p = \frac{\pi(r''^2 - r'^2)p}{\sin\frac{\theta}{2}}.$$

La pression totale, pour une même réduction, est donc d'autant plus grande que $\sin\frac{\theta}{2}$ est petit.

Les projections des forces (P) sur l'axe donneront

$$P' = P\sin\frac{\theta}{2} = \pi(r''^2 - r^2)p,$$

valeur indépendante de l'angle $\frac{\theta}{2}$ et proportionnelle à la différence des carrés des rayons, c'est-à-dire à la surface de réduction projetée sur un plan perpendiculaire à l'axe du mandrin.

Le frottement sur le cône de contact serait

$$F = Pf = \frac{\pi(r''^2 - r'^2)}{\sin\frac{\theta}{2}}pf.$$

Les projections de ce frottement sur l'axe sont

$$F' = F\cos\frac{\theta}{2} = Pf\cos\frac{\theta}{2} = \pi pf(r''^2 - r'^2)\frac{\cos\frac{\theta}{2}}{\sin\frac{\theta}{2}}$$

$$= \pi pf(r''^2 - r'^2)\operatorname{cotg}\frac{\theta}{2}.$$

Les pressions et les frottements sur la partie cylindrique du mandrin ne changeant pas, on a les mêmes valeurs que dans le cas général, soit

$$P'' = 2\pi r'hp'' \qquad F'' = 2\pi r'hp''f.$$

La relation d'équilibre devient

$$P_m = P' + F' + F'' = \pi p (r''^2 - r'^2) + \pi p f (r''^2 - r'^2) \cot g \frac{\theta}{2} + 2\pi r' h p'',$$

$$P_m = \pi p (r''^2 - r'^2) \left(1 + f \cot g \frac{\theta}{2}\right) + 2\pi r' h p'' f.$$

Le travail de P_m sera, si v est la vitesse de cette force,

$$T = P_m v = \pi p v (r''^2 - r'^2) + \pi p f v (r''^2 - r'^2) \cot g \frac{\theta}{2} + 2\pi r' h p'' f v.$$

Le premier terme est

$$p\pi (r''^2 - r'^2) v = p \text{ (volume de métal déplacé).}$$

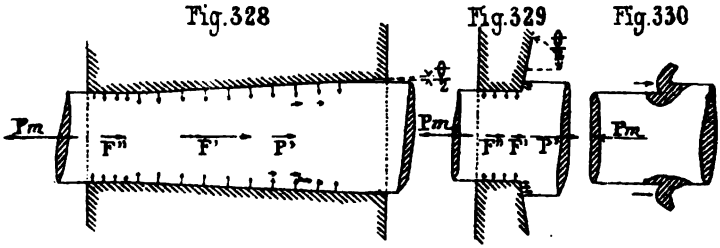
Les deux autres termes sont les résistances de frottement dont le travail donne lieu à un échauffement relativement grand dans certains cas; les pièces étirées à froid prennent parfois une température de plus de 200°, favorable à l'étirage, par exemple, lorsqu'il s'agit de fils, de tuyaux. Mais, lorsque la température s'élève davantage, elle nuit à la durée du mandrin, et si le métal présente alors une période critique de ductilité, il y a lieu de craindre les criques. Dans le cas de travail à chaud, la chaleur développée par le frottement réduit la vitesse de refroidissement.

Le rendement de l'opération est d'autant plus élevé que le premier terme est plus grand par rapport à la somme des deux autres.

Remarquons que plus l'angle $\frac{\theta}{2}$ est petit, plus les pressions normales sur la pièce sont grandes pour une même réduction de diamètre, et la projection P' reste néanmoins constante. Il s'ensuivrait que l'on aurait avantage à adopter *(fig. 328)* des cônes très aigus, pressant fortement le métal sur une grande surface d'action en le refoulant.

Mais ces pressions énergiques comprimeraient le métal presque normalement à la direction d'étirage; il n'y aurait que

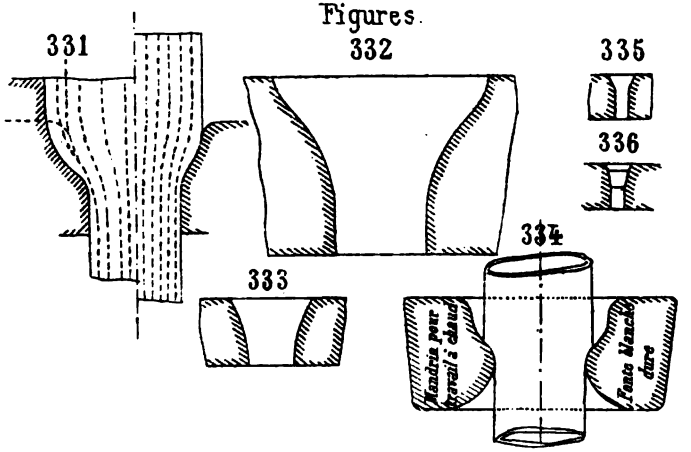
de faibles composantes dans le sens longitudinal. Il y aurait surtout un frottement excessivement grand, dont la projection F' aurait aussi une grande valeur variant suivant cotg $\frac{\theta}{2}$. Cette valeur de F' deviendrait beaucoup plus grande que P', qui se rapporte à l'action utile; P*m* serait très élevé. Au contraire, faisant $\frac{\theta}{2}$ très grand, voisin de 90° par exemple *(fig. 329)*, les pressions totales P diminueraient en donnant des composantes longitudinales de grande valeur relative, de très faibles composantes normales à l'axe; le métal serait peu comprimé. Cependant, la direction longitudinale des efforts serait peu favorable



à l'étirage, ou devrait prendre une valeur considérable, parce que la couche à déplacer serait sollicitée par des forces qui tendraient à la cisailler, à l'arracher. Le métal ne pénétrerait pas dans la masse pour s'écouler par le mandrin, il se refoulerait en dehors, et il faudrait alors vaincre une action d'arrachement *(fig. 330)*.

Le frottement F serait très réduit; il en serait de même de la projection F' qui tendrait vers zéro. Ces deux valeurs extrêmes de $\frac{\theta}{2}$, donnant lieu à des phénomènes tout à fait différents, montrent que, pour faciliter l'écoulement du métal à travers le mandrin, il y a une valeur intermédiaire plus favorable que les autres.

S'inspirant des formes données aux orifices d'écoulement des liquides, il convient de donner au mandrin un profil raccordé à la partie cylindrique par un arc de courbure variable dirigeant les fibres du métal sans trop les comprimer, ni trop les refouler *(fig. 331)*. Les *figures 332 à 334* montrent les profils ordinairement adoptés pour l'étirage des tuyaux; s'il s'agit de tuyaux rectifiés au plus près, la filière en acier trempé est rectifiée à la meule, car le moindre défaut a une influence fâcheuse sur la régularité du produit; pour les fils, le profil est conique *(fig. 335* et *336)*. Pour l'étirage à chaud des grosses



pièces atteignant un diamètre de $0^m,40$ et plus, le mandrin est fortement arrondi *(fig. 334)*.

Application au raccord conique avec les mêmes données du cas général comportant un raccord torique.

$$\text{Pression } P = \frac{\pi(r''^2 - r'^2)p}{\sin\frac{\theta}{2}} = \frac{3,14(\overline{55}^2 - \overline{50}^2)60}{\sin 24°,10}$$

$$= \frac{3,14 \times 5,25 \times 60}{0,41} = 241.240^{kg}.$$

Les projections seraient

$$P' = \pi(r''^2 - r'^2)p = 3{,}14\,(525)\,60 = 98.910^{kg}.$$

Le frottement des réactions a pour valeur

$$F = Pf = 241.240 \times 0{,}15 = 36.186^{kg}.$$

Ce frottement donne une projection sur l'axe :

$$F' = F \cos\frac{\theta}{2} = 36.186 \times 0{,}912 = 33.000^{kg}.$$

La pression sur la partie cylindrique du mandrin s'élève à

$$P'' = 2\pi r' h p'' = 2 \times 3{,}14 \times 50 \times 60 \times 10 = 188.400^{kg}.$$

Le frottement correspondant est

$$F'' = 188{,}400 \times 0{,}15 = 28{,}260.$$

La traction motrice serait donc

$$P_m = P' + F' + F'' = 98.910 + 33.000 + 28.260 = 160.170^{kg};$$

avec le mandrin arrondi on avait trouvé $P_m = 154.602^{kg}$.

Le travail mécanique par seconde à la vitesse $v = 0.040$ s'élèverait à

$$T = 160.170 \times 0{,}040 = 6.406^{kgm}.$$

Le rapport du travail utile au travail des frottements serait

$$\frac{98.910}{61.260} = \text{environ } \frac{3}{2} = 1.5.$$

Le rapport du travail total au travail des frottements est

$$\frac{T}{Tf} = \frac{160.170}{61.260} = 2{,}62, \qquad \text{l'inverse} = \frac{1}{2{,}62} = 0{,}38.$$

Si on veut déterminer la vitesse relative du mandrin et des deux tronçons de la pièce, celui de sortie et celui d'entrée, il suffit de considérer que le mandrin se déplaçant d'une longueur v, le tronçon de sortie possède également cette vitesse relative v, tandis que le tronçon d'entrée a reculé d'une longueur v' correspondant au volume de métal déplacé.

On peut poser l'égalité

$$(\text{volume déplacé}) = \pi(r''^2 - r'^2)v,$$

attendu que tous les points de contact se sont déplacés horizontalement de v, et que le volume engendré est celui hachuré *(fig. 337)*.

Ce volume de métal a été refoulé du côté du tronçon d'entrée et en fonction du rayon r'' il a pour valeur

$$\pi r''^2 v' = \pi(r''^2 - r'^2)v,$$

soit

$$v' = \frac{(r''^2 - r'^2)v}{r''^2}$$

et

$$\frac{v'}{v} = \frac{r''^2 - r'^2}{r''^2}.$$

La vitesse v' d'entrée ou de refoulement est d'autant plus grande par rapport à v que la réduction est grande et le diamètre primitif est petit.

La longueur finale prise par l'unité de longueur du prisme primitif est évidemment dans le rapport

$$\frac{l}{1} = \frac{r''^2}{r'^2}.$$

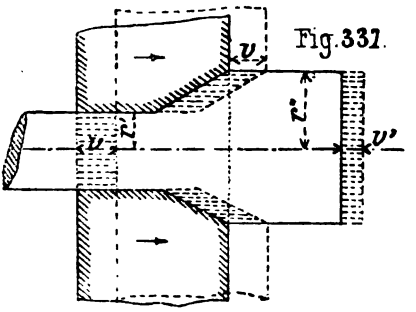


Fig. 337.

L'étirage de pièces profilées donne lieu à de telles variations d'efforts, de vitesse, qu'il n'est guère possible de chercher à établir une règle générale pour se rendre compte de l'énergie dépensée dans des conditions plus ou moins avantageuses. La pratique a, ici, le pas sur la théorie.

Pour les tuyaux, ou autres pièces creuses telles que récipients en acier ou autres, si on les étire sur mandrin intérieur, on peut appliquer les formules indiquées en donnant à la pression superficielle moyenne les valeurs obtenues dans des essais

Essais d'étirage à la filière

NUMÉRO D'ORDRE de l'essai	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	NUMÉRO du trou de la filière	DIMENSIONS DIAMÉTRALES			SECTIONS			EFFORTS DE TRACTION EN KILOGRAMMES		
			DIAMÈTRE primitif	DIAMÈTRE d'étirage	RÉDUCTION diamétrale	PRIMITIVE	D'ÉTIRAGE	RÉDUCTION	TOTAL T	FROTTEMENT f	RÉSISTANCE r
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Fil de cuivre recuit donnant une résistance à la traction de 22kg par millimètre carré.	3	8,06	»	»	51,02	»	»	»	»	»
		4	8,06	7,80	0,26	51,02	48,78	3,24	320	120	200
		5	7,80	7,74	0,06	47,78	47,05	0,73	240	160	80
		5	8,06	7,74	0,32	51,02	47,05	3,97	360	175	185
		6	7,74	7,62	0,12	47,05	45,60	1,45	290	120	170
		6	8,06	7,62	0,44	51,02	45,60	5,42	390	210	180
		7	7,62	7,40	0,22	45,60	43,00	2,60	300	145	155
		7	8,06	7,40	0,66	51,02	43,00	8,02	400	190	210
		8	7,40	7,30	0,10	43,00	41,85	1,15	240	110	130
		8	8,06	7,30	0,76	51,02	41,85	9,17	420	190	230
		9	7,30	7,05	0,25	41,85	39,03	2,82	280	150	130
		10	7,05	6,92	0,13	39,03	37,61	1,42	220	115	105
		11	6,92	6,70	0,22	37,61	35,25	2,36	270	120	150
		12	6,70	6,60	0,10	35,25	34,21	1,04	190	120	70
		13	6,60	6,50	0,10	34,21	33,18	1,03	220	110	110
		13	7,05	6,50	0,55	39,03	33,18	5,85	350	150	200
		14	6,50	6,35	0,15	33,18	31,67	1,51	250	120	130
		15	6,35	6,14	0,21	31,67	29,60	2,07	250	120	130
		16	6,14	5,94	0,20	29,60	27,71	1,89	210	110	100
		16	7,05	5,94	1,11	39,03	27,71	11,32	420	120	300
		17	5,94	5,86	0,08	27,71	26,97	0,74	230	90	140
		18	5,86	5,74	0,12	26,97	25,87	1,10	210	80	130
		19	5,74	5,56	0,18	25,87	24,28	1,59	240	100	140
		20	5,56	5,52	0,04	24,28	23,93	0,35	130	85	45
		21	5,52	5,42	0,10	23,93	23,07	0,86	190	80	110
		21	7,05	5,42	1,63	39,03	23,07	15,96	510	100	410
		22	5,42	5,28	0,14	23,07	21,89	1,18	200	90	110
		23	5,28	5,10	0,18	21,89	20,43	1,46	210	90	120
		24	5,10	5,03	0,07	20,43	19,87	0,56	180	75	105
		24	7,05	5,03	2,02	39,03	19,87	19,16	540	»	»
2	Fil de laiton.	13	7,05	6,50	0,55	39,03	33,18	5,85	510	170	340
		16	6,50	5,94	0,58	33,18	27,71	5,47	410	200	210
		16	7,05	5,94	1,1	39,03	27,71	11,32	720	210	510
		21	5,94	5,42	0,50	27,71	23,07	4,64	440	110	330
		21	7,05	5,42	1,63	39,03	23,07	15,96	870	90	780
3	Fil de fer fondu recuit.	13	7,05	6,50	0,55	39,03	33,18	5,85	700	340	360
		16	6,50	5,94	0,58	33,18	27,71	5,47	540	300	240
		16	7,05	5,94	1,1	39,03	27,71	11,32	840	320	520
		21	5,94	5,42	0,50	27,71	23,07	4,64	580	210	370
		21	7,05	5,42	1,63	39,03	23,07	15,96	920	120	800

par traction directe.

Tableau n° 30 — A.

RAPPORT de $\frac{T_M}{T}$	RAPPORT de $\frac{t_2}{t_1} = \frac{T_M}{T}$	TENSION PAR M^{m2} DE RÉDUCTION DE SECTION — TOTALE	FROTTEMENT	DIFFÉRENCE	EFFORTS CUMULÉS — TOTAL	FROTTEMENT	DIFFÉRENCE	OBSERVATIONS
13	14	15	16	17	18	19	20	21
»	»	»	»	»	»	»	»	Premier passage rectifiant et redressant l'éprouvette.
0,625	1,66	99	37	62	320	120	200	
0,33	0,5	330	220	110	560	280	280	Dans ces essais, on pourra relever des chiffres plus ou moins contradictoires, par suite de certaines difficultés pour bien conduire les diverses opérations et pour apprécier à quelques centièmes près le diamètre de l'éprouvette, qui n'est pas toujours exactement cylindrique.
0,51	1,05	92	44	48	»	»	»	
0,58	1,42	200	84	116	850	400	450	
0,54	0,85	72	38,8	33,2	»	»	»	
0,51	1,07	116	56	60	1.150	545	605	
0,51	1,1	50	24	26	»	»	»	
0,54	1,18	210	96	114	1.390	655	735	
0,55	1,2	46	21	25	»	»	»	
0,46	0,865	100	53	47	»	»	»	
0,47	0,91	155	82	73	220	115	105	L'éprouvette a été recuite après ce passage. Le recuit a eu pour effet d'augmenter le diamètre en le portant de 7,03 à 7,25. Le diamètre 7,05 a été rétabli par un passage non indiqué. C'est ce diamètre qui a servi de nouveau point de départ pour les essais comparatifs des fortes et petites réductions.
0,55	1,25	114	52	62	490	235	255	
0,37	0,58	182	115	67	680	355	325	
0,50	1	220	106	114	900	465	435	
0,57	1,31	60	25,5	34,5	»	»	»	
0,52	1,08	166	80	86	1.150	585	565	
0,52	1,08	120	58	62	1.400	705	695	
0,47	0,91	111	58	53	1.610	815	795	
0,285	2,5	37	10,6	26,4	»	»	»	
0,61	1,44	310	120	190	1.840	905	935	
0,62	1,62	190	72	118	2.050	985	1.065	
0,58	1,4	150	63	87	2.290	1.085	1.205	L'éprouvette s'est rompue au point d'attache en accusant une forte striction, dénotant que le métal possédait encore une grande ductilité, et montrant que, dans la partie étirée de diamètre 5,03, il pouvait résister, avant de rompre, à un effort par millimètre carré supérieur à $\frac{540^{kg}}{19,87} = 27^{kg},2$.
0,35	0,53	370	240	130	2.420	1.170	1.250	
0,58	1,38	220	93	127	2.610	1.250	1.360	
0,80	4,1	32	6,2	25,8	»	»	»	
0,55	1,22	170	76	94	2.810	1.340	1.470	
0,57	1,22	144	62	82	3.020	1.430	1.590	
0,58	1,4	322	132	190	3.200	1.505	1.695	
»	»	»	»	»	»	»	»	
0,665	2	87,2	29	58,2	510	170	340	Ce laiton présentait une résistance à la traction de 35^{kg} par millimètre carré de surface primitive.
0,51	1,05	75	36,5	38,5	920	370	550	
0,71	2,4	63,5	18,6	44,9	»	»	»	
0,75	3	95	23,7	71,3	1.360	480	880	
0,90	8,6	54,2	5,6	48,6	»	»	»	A ce point, sous la charge de 870^{kg}, le métal résiste à 38^{kg}.
0,51	1,06	120	58	62	700	340	360	Ce fer présentait une résistance à la traction de 36^{kg} par millimètre carré.
0,44	0,8	99	55	44	1.240	640	600	
0,62	1,62	69	26	43	»	»	»	
0,63	1,78	125	45,2	79,8	1.820	850	970	Sous la charge 920^{kg}, le métal supporte une traction de 39^{kg},5 par millimètre carré.
0,87	6,7	57,8	7,5	50,3	»	»	»	

Essais d'étirage à la filièr

NUMÉRO D'ORDRE de l'essai	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	NUMÉRO du trou de la filière	DIMENSIONS DIAMÉTRALES			SECTIONS			EFFORTS DE TRACTI EN KILOGRAMMES		
			DIAMÈTRE primitif	DIAMÈTRE d'étirage	RÉDUCTION diamétrale	PRIMITIVE	D'ÉTIRAGE	RÉDUCTION	TOTAL T	FROTTEMENT f	DIFFÉRENCE
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	Fil de plomb.	4	8,06	»	»	»	»	»	»	»	»
		6	8,06	7,62	0,44	51,02	45,60	5,42	14	2	12
		8	7,62	7,30	0,32	45,60	41,85	3,75	15	4	11
		10	7,30	6,92	0,38	41,85	37,61	4,24	17	4	13
		12	6,92	6,60	0,32	37,61	34,21	3,40	12	4	11
		12	8,06	6,60	»	»	»	»	»	»	»
5	Rectification du diamètre.	13(1)	»	6,5	»	»	»	»	»	»	»
		15	6,5	6,14	0,36	33,18	29,60	3,58	15	4	11
		17	6,14	5,86	0,28	29,60	26,97	2,63	17	4	13
		17	6,5	5,86	0,64	33,18	26,97	6,21	22	6	16
		19	5,86	5,56	0,30	26,97	24,28	2,69	13	1,5	11
		19	6,5	5,52	0,98	33,18	23,92	9,26	28(2)	»	»
		21	»	5,42	»	23,07	»	»	»	»	»
		≥3	5,42	5,10	0,32	23,07	20,40	2,67	8	1	7
		25	5,10	4,95	0,15	20,40	19,20	1,20	7	1	6
		25	5,42	4,95	0,47	23,07	19,20	3,87	9,5	1,5	8
		27	4,95	4,76	0,19	19,02	17,70	1,32	7,5	1	6
		27	5,42	4,76	0,66	23,07	17,70	5,37	12	2	10
		29	4,76	4,49	0,27	17,70	15,80	1,90	8	1	7
		29	5,42	4,49	0,93	»	»	»	18(3)	»	»
6	Éprouvette de fer.	»	24,1	22,9	1,2	456	411	45	5650(4)	350	5300
7	Id.	»	24,6	18,3	6,3	475,05	262,88	212	9200(5)	»	»
8	Id.	»	26,65	25,6	1,05	557	514	42,65	5250	»	»

NUMÉRO D'ORDRE de l'essai	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	ÉPAISSEUR PRIMITIVE	DIMENSIONS DIAMÉTRALES			ÉPAISSEU D'ÉTIRAG
			DIAMÈTRE primitif	DIAMÈTRE d'étirage	RÉDUCTION diamétrale	
1	2	3	4	5	6	7
9	Tube de cuivre brasé.	2,25	70	65	5	2,35
10	Id.	2,25	84,4	81,2	3,2	2,275
11	Id.	2,75	145	140	5	2,8

par traction directe.

Tableau n° 30 — *B.*

RAPPORT de $\frac{12}{10} = \frac{T_M}{T}$ 13	RAPPORT de $\frac{12}{14} = \frac{T_M}{T}$ 14	TENSION PAR M^{m2} DE RÉDUCTION DE SECTION — TOTALE 15	FROTTEMENT 16	DIFFÉRENCE 17	EFFORTS CUMULÉS — TOTAL 18	FROTTEMENT 19	DIFFÉRENCE 20	OBSERVATIONS 21
»	»	»	»	»	»	»	»	1. Le passage ne peut s'effectuer, le fil se rompt sous une traction de 36^{kg}, soit environ 1^{kg} par millimètre carré.
0,14	6	2,6	0,37	2,23	14	2	2	
0,26	2,7	4	1,4	2,6	29	6	23	
0,23	3,2	4	0,95	3,05	46	10	36	
0,27	2,7	5	1,18	3,82	61	14	47	2. Sous l'effort 28^{kg}, le fil s'allonge, et sans se casser, il se réduit à 5,46, diamètre rectifié à 5,42.
»	»	»	»	»	»	»	»	
»	»	»	»	»	»	»	»	Sous cette traction de 28^{kg}, le métal supporte une charge de 1^{kg},2 par millimètre carré.
0,27	2,7	4,2	1,1	3,1	15	4	11	
0,23	3,2	6,5	1,5	5	32	8	24	
0,27	2,6	3,5	0,96	2,54	»	»	»	3. Sous l'effort 18^{kg}, le fil casse ; le diamètre sous charge étant de 3,7, ce qui donne une tension par millimètre carré de 1^{kg},7.
0,11	7,5	5	0,55	4,45	45	9,5	35,5	
»	»	3	»	»	»	»	»	Ainsi donc, successivement, la résistance a augmenté de 1^{kg} à 1^{kg},2 et 1^{kg},7.
»	»	»	»	»	»	»	»	
0,12	7	3	0,37	2,63	8	1	7	
0,14	6	5,8	0,8	5	15	2	13	
0,16	5,3	2,5	0,31	2,19	»	»	»	4. Au départ du démanchement, l'effort d'adhérence était de 720^{kg}.
0,13	6,50	5,7	0,75	4,95	22,5	3	19,5	
0,16	5	2,4	0,37	2,03	»	»	»	
0,12	7	4,2	0,51	3,69	30,5	4	26,5	5. L'éprouvette a cassé à la naissance de l'épaulement, et suivant un bec de flûte.
»	»	»	»	»	»	»	»	Le rapport des diamètres $\frac{18,3}{24,6} = 0,73$.
»	»	126	7,8	118,2	»	»	»	
»	»	43,5	»	»	»	»	»	
»	»	125	»	»	»	»	»	

RÉDUCTION 8	EFFORTS TOTAUX de traction en kilogram. 9	LONGUEUR PRIMITIVE 10	LONGUEUR D'ÉTIRAGE 11	ALLONGEMENT 12	TENSION TOTALE par m^{m2} de réduction de section 13	OBSERVATIONS 14
14,08	2.080	3.300	3.400	100	148	Ces essais ne sont pas assez nombreux pour permettre de déduire autre chose que le coefficient de résistance d'étirage pour les réductions ordinaires que donne la pratique courante.
16,2	2.560	4.010	4.120	110	158	
24,25	4.480	4.000	4.080	80	184	

analogues au travail d'étirage à produire. Mais, si les tuyaux sont étirés sans mandrin intérieur, ne subissant généralement dans ce cas que de faibles réductions successives, on peut appliquer les relations simples pour lesquelles on a considéré un cône de contact.

Nous signalerons, dans la deuxième partie, les divers types de mandrins complexes dont certains, de forme hélicoïdale, favorisent l'étirage. Nous trouverons aussi des mandrins rotatifs réduisant le frottement dans une grande mesure.

ESSAIS D'ÉTIRAGE AU MANDRIN-FILIÈRE.

Les essais d'étirage au mandrin se sont faits dans les conditions suivantes, pour les éprouvettes sous forme de fil. Le mandrin-filière était solidaire d'un étau; le fil, passé dans un trou, était directement tiré par un palan. Entre le point d'attache du palan et la griffe pinçant le fil, était placé un dynamomètre mesurant d'abord l'effort de traction total pendant l'étirage. Puis, pour mesurer le frottement, la pince et le dynamomètre étaient disposés du côté opposé, et le recul du fil étant produit, le dynamomètre marquait l'effort de frottement sur la partie cylindrique de la filière, qui était, pour les petits diamètres, jusqu'à 8^{mm}, du type de fabrication ordinaire. Les diamètres successifs du fil étaient mesurés avec un palmer au centième, à manchon.

Pour les gros diamètres, nous avons opéré à la machine à essayer les métaux, en produisant le passage soit par traction, soit par compression. Les résultats sont consignés dans le tableau précédent (n° 30).

Dans l'essai n° 1 avec du fil de cuivre recuit, nous avons poussé les étirages successifs depuis le diamètre 8,06 jusqu'au diamètre 5,03 en vingt passages.

Si on considère tout d'abord les réductions égales en diamètre, on voit qu'entre les limites des deux diamètres 8 et 5^{mm}, les

résistances d'étirage par millimètre carré de section réduite diffèrent peu entre elles.

Ainsi pour les réductions de diamètres égales à 0,26, 0,25, on trouve 99^{kg} et 109^{kg}; pour 0,22, on trouve 116^{kg} et 114^{kg}; pour 0,10 et 0,12, on trouve 200^{kg}, 210^{kg}, 220^{kg}, 190^{kg}, 220^{kg}.

Les différences entre ces chiffres, en plus ou en moins, proviennent, soit de mesures plus ou moins précises, soit de l'état d'écrouissage du métal.

Il s'ensuit qu'entre ces limites de diamètres, on peut, sans grande erreur, rapporter les diverses résistances, soit aux réductions des diamètres, soit aux réductions des sections, et établir une loi très approchée de la variation des résistances d'étirage.

Influence du diamètre.

Si on trace les courbes de tension par millimètre carré de réduction de section pour les diamètres 8,06 et 7,05 en partant d'éprouvettes recuites et successivement réduites dans les conditions des essais, on voit *(fig. 338)* que la courbe du diamètre primitif 8,06 a ses ordonnées de traction totales inférieures à celles de la courbe du diamètre primitif 7,05.

La différence est faible entre les ordonnées, mais les diamètres diffèrent peu également. Néanmoins, en considérant les valeurs obtenues avec des diamètres de 2,00 sur du cuivre de qualité analogue, on peut admettre que pour des diamètres supérieurs à quelques millimètres et des réductions variables dans les limites possibles, le diamètre a peu d'influence sur la variation des tensions par millimètre carré. Il en est de même pour le frottement; cependant, on remarque que la courbe des frottements 8,05 est au-dessus de celle 7,05, ce qui se conçoit aisément, si l'on considère qu'un gros fil présente plus de ressort, plus d'élasticité qu'un petit.

Les courbes du cuivre montrent que, pour de faibles réductions voisines de un dixième de millimètre, la résistance par

millimètre carré de section réduite atteint ou dépasse 300^{kg}, valeur très élevée.

Ainsi, pour une réduction de 0^{mm},07, on a 322^{kg}; au contraire, pour de fortes réductions voisines de 1^{mm} et plus, la résistance prend une valeur d'environ 40^{kg}.

Pour des réductions de 0^{mm},5, la résistance est moyennement de 65^{kg}.

On s'explique aisément, ainsi d'ailleurs que nous l'avons déjà

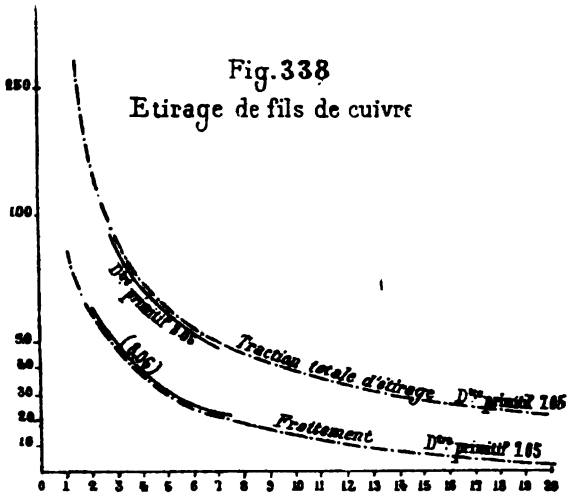


Fig. 338
Etirage de fils de cuivre

signalé, la progression rapide de l'augmentation des résistances rapportées au millimètre carré de section réduite, pour un métal possédant une certaine élasticité, donnant lieu à un frottement dont l'effet est de faire tendre vers l'infini la valeur de la résistance rapportée à l'unité de section lorsque la réduction tend vers zéro.

Cette résistance mesurant également le travail mécanique sur l'unité de longueur d'étirage, il y a grand avantage à opérer en faisant de fortes réductions plutôt que de faibles réductions.

On voit que, pour passer du diamètre 8,06 au diamètre 7,30, si on opère en un seul passage, il suffit d'un effort total de 420^{kg}, tandis qu'en opérant en quatre passages, la somme des efforts s'élève à 1,150^{kg}.

Pour comparer exactement les énergies dépensées, il faut considérer l'étirage d'une longueur déterminée; soit, par exemple, 1^{m}, longueur qui devient successivement

Après le 1er passage	1,060	travail	1,06	× 320^{kg} =	340^{kgm}
Après le 2e passage	1,080	—	1,08	× 240^{kg} =	260^{kgm}
Après le 3e passage	1,120	—	1,120	× 290^{kg} =	325^{kgm}
Après le 4e passage	1,180	—	1,180	× 300^{kg} =	355^{kgm}
			TOTAL.		1280^{kgm}
Travail en un seul passage			1,180	× 420^{kg} =	495^{kgm}

$$\text{Rapport } \frac{1280}{495} = 2,58.$$

Il faut donc deux fois et demie plus d'énergie en quatre passages qu'en un seul. Pour passer du diamètre 7,05 à 5,03 par de nombreux passages, le tableau montre que la somme des efforts développés ou cumulés s'élève à 3.200^{kg}, tandis que, pour un seul passage, l'effort est voisin de 540^{kg}. Ces chiffres ont leur éloquence.

La pratique s'inspire de ce résultat en donnant de fortes réductions dans les premiers passages, alors que le métal, très ductile, peut sans inconvénient supporter de grandes déformations.

Il y a aussi une limite de réduction pour laquelle le fil se romprait à la traction, ainsi que l'indique l'essai pour le passage n° 24; le diamètre 7,05 étant réduit à 5,03, l'opération ne peut se faire.

On exprime facilement la relation d'équilibre pour cette période de l'essai. En appelant d le diamètre primitif, d' le diamètre réduit, Re la résistance d'étirage par millimètre carré de section réduite, par R la résistance à la traction du métal, on a la formule d'équilibre :

$$\frac{\pi d'^2}{4} R = \frac{\pi(d^2 - d'^2)}{4} Re$$

soit $$d' = d\sqrt{\frac{Re}{R + Re}} \quad \text{ou} \quad \frac{d'}{d} = \sqrt{\frac{Re}{R + Re}}.$$

Si on l'applique au passage ci-dessus, on peut déduire, au plus près, la valeur de

$$Re = \frac{d'^2 R}{d^2 - d'^2} = \frac{7{,}05^2 \times 27^{kg}}{7{,}05^2 - 5{,}03^2} = \frac{50 \times 27{,}2}{50 - 25{,}5} = \frac{136{,}0}{24{,}5} = 55^{kg},$$

valeur un peu élevée, attendu que pour la réduction n° 21, on a $Re = 32^{kg}$, et que, pour le n° 24, cette valeur devrait être moindre si la loi de décroissance continue.

En supposant $Re = 30^{kg}$, il vient

$$d' = 7{,}05\sqrt{\frac{30}{27 + 30}} = 7{,}05 \times 7{,}3 = 5{,}1 > 5{,}03.$$

Influence du frottement.

Le frottement sur la partie conique ou sur la partie arrondie d'entrée du mandrin-filière ne saurait se mesurer. Nous n'avons pu faire ressortir que le frottement sur la partie cylindrique non lubrifiée.

Le tableau donne les valeurs pour chaque passage. Elles sont très variables par rapport à l'effort utile et par rapport à la réduction par millimètre carré de section réduite.

On constate bien : que l'importance du frottement est d'autant

plus grande que la réduction est plus faible; les courbes de frottement ont donc une allure analogue à celle des courbes des efforts totaux rapportés au millimètre carré de section de réduction.

En supposant une réduction tendant vers zéro, le frottement n'étant pas nul, la pression de réduction au passage correspondant précisément à l'élasticité du métal, le fil reprenant à sa sortie le diamètre primitif, la valeur du frottement rapportée à l'unité de section réduite deviendrait infinie; la courbe a donc pour asymptote l'axe des ordonnées.

Avec de fortes réductions, l'élasticité qui est pour ainsi dire une constante, a moins d'influence sur le rendement mécanique. Si on considère, même, que l'effort de traction allonge le métal dans le trou de passage cylindrique, le frottement sur cette partie tend vers zéro, de sorte que la courbe de frottement couperait l'axe des abscisses en un point pour lequel cette hypothèse se réalise.

De plus, si on admet un métal très malléable subissant une forte réduction sans arrachement ni rupture, l'effort de traction tendrait vers une valeur constante, celle correspondant à l'étirage du métal par entraînement d'une partie de la masse buttant contre la filière.

La courbe des résistances totales tendrait donc vers une valeur constante.

Faisons ressortir que pour une réduction du diamètre $8^{mm},06$ à $7^{mm},40$ ou à $7^{mm},30$, le frottement a même valeur; que les efforts de traction sont de 400 et 420^{kg} donnant un rapport $\frac{T'_u}{T} = 0,51$ et $0,55$.

Avec le passage n° 5, le diamètre $7^{m},80$ passant à $7,^{m}74$, la réduction étant $0^{mm},06$, le rapport tombe à $0^{m},33$; c'est-à-dire que le frottement est trois fois plus élevé que l'effort utile.

Nous voyons que, dans l'essai n° 1, ce rapport est un peu supérieur à $0^{m},50$.

Ainsi donc, pour le cuivre, et dans les limites de l'essai, sans lubrifier l'éprouvette, le travail dépensé pour le frottement (inutile) est sensiblement égal au travail utile. Ce rapport ressort bien des valeurs cumulées donnant à la fin de l'essai : 1505^{k} pour les frottements et 1695^{kg} pour les efforts utiles.

Dans la filière employée, la partie cylindrique était relativement longue par rapport au diamètre. Il suffirait, pour réduire le frottement en question, à volonté, de réduire la partie cylindrique et d'employer, comme on le fait pour les gros diamètres, pour les tubes, des filières à contact arrondi sans portion cylindrique. On pourrait ne réserver une partie cylindrique que pour les derniers passages finisseurs; on réaliserait ainsi dans la tirerie une grande économie sur l'énergie dépensée.

Le recuit a pour effet de diminuer l'importance du frottement, surtout au début, dans le premier passage. Au contraire, l'élasticité, la dureté du métal, plus grande après de nombreux passages, donnent au frottement une valeur relative plus grande.

A cause des augmentations de diamètre (1) que provoque le recuit, nous n'avons pas jugé bon de recuire après chaque passage, afin d'opérer constamment, dans les mêmes conditions, ou tout au moins aussi près que possible de ces conditions. Les lois établies sont donc subordonnées à la façon d'opérer.

L'influence du recuit est nettement marquée en ce qui concerne le frottement, en comparant le premier passage (n° 4) avec le n° 9, les réductions étant 0,26 et 0,25 sur le diamètre. La tension de frottement est respectivement 37^{kg} et 53^{kg}.

Effet de la vitesse.

Nous avons fait varier la vitesse du simple au double, au triple et plus. L'effort augmente relativement peu, 10 à 20 0/0.

(1) En mesurant le diamètre des éprouvettes encore chaudes, tenues à la main, au moyen du palmer au centième, nous avons constaté qu'il est facile de suivre les effets de la contraction du métal se refroidissant; le diamètre étant seulement de quelques millimètres, on apprécie facilement les centièmes successifs de réduction de diamètre.

puis l'échauffement du fil et de l'outil se produisant très rapidement, le trou augmente de diamètre, quelques centièmes, ce qui suffit pour ramener la valeur de l'effort à celle qu'il avait précédemment ou à une valeur, même plus faible. Il faudrait pouvoir opérer avec de grandes variations de vitesses, et dans ce cas, le frottement diminuant de valeur, si la lubrification est bien assurée, la diminution compenserait ou non l'augmentation de résistance du métal.

Effet de l'étirage prononcé.

Le cuivre sur lequel nous avons opéré présentait une résistance de 22^{kg} par millimètre carré à la traction, sur recuit.

En poursuivant l'étirage jusqu'à la rupture de l'éprouvette sous réduction trop forte, nous voyons que l'effort de 540^{kg} correspondant à la rupture d'une section primitive de $19^{mm²},87$, donne une résistance de $27,2^{kg}$ par millimètre carré. De plus, l'allongement de striction et la réduction de section à la striction dénotaient que le cuivre fortement étiré présentait des qualités de résistance très améliorées.

Essais comparatifs d'étirage du cuivre, du laiton, du fer et du plomb.

Essais n°s 1, 2, 3 et 4.

Afin d'apprécier les résistances d'étirage du cuivre, du laiton, du fer et du plomb, et permettre de les comparer, nous avons opéré à peu près dans les mêmes conditions, sur des éprouvettes de même diamètre, essais n°s 2, 3, 4.

Nous avons néanmoins complété les courbes des épures *(fig. 339* et *340)* en prenant des éléments sur d'autres essais que nous avons le regret de ne pouvoir signaler ici. Nous avons ainsi obtenu des courbes qui se distinguent bien les unes des

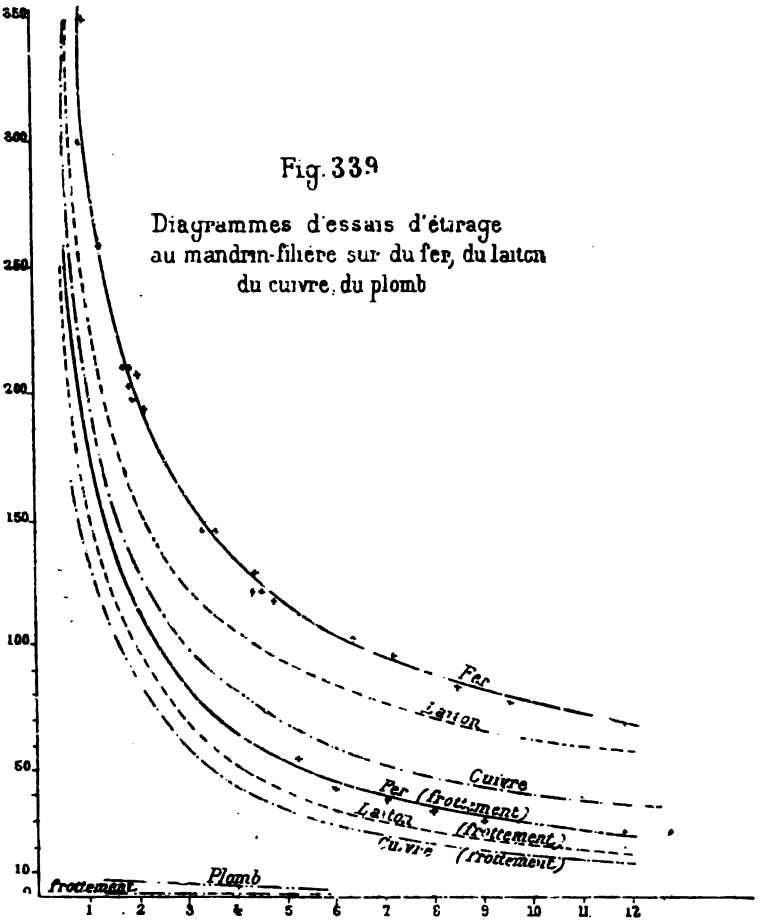


Fig. 339

Diagrammes d'essais d'étirage au mandrin-filière sur du fer, du laiton du cuivre, du plomb

Abscisses. *Réductions sectionnelles à échelle de 0 010 pour 1 millimètre carré de réduction*

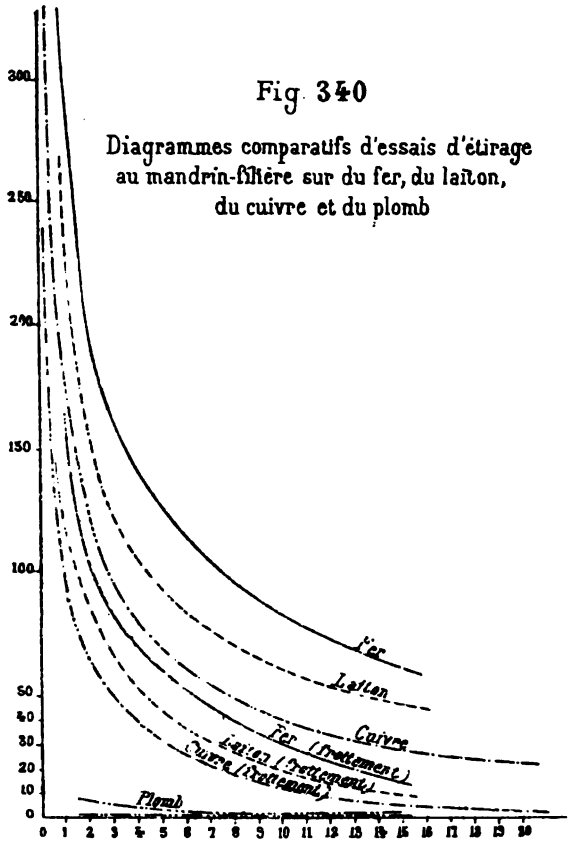
Ordonnées *Traction par millimètre carré de section réduite à échelle de 3 m/m 3 pour 10 kilogrammes*

autres, soit qu'on les rapporte aux réductions diamétrales ou aux réductions des sections, ce qui est plus rationnel, la section multipliée par l'effort donnant la valeur de l'effort de traction

total et par suite une valeur proportionnelle au travail dépensé sur l'unité de longueur. D'ailleurs, ces courbes présentent une

Fig. 340

Diagrammes comparatifs d'essais d'étirage au mandrin-filière sur du fer, du laiton, du cuivre et du plomb



Abscisses : *Différence des diamètres à échelle de 5 millimètres pour 1 dixième de millimètre.*

Ordonnées : *Traction par millimètre carré de section à échelle de 3 m/m 3 pour 10 kilogrammes*

allure assez semblable, permettant de juger comparativement les résistances des métaux considérés. Nous voyons que le fer est, parmi ces métaux, celui qui exige le plus d'énergie et développe le plus de frottement sur la filière.

Puis, c'est le laiton, qui s'éloigne assez du fer, alors que, pour le martelage et la compression, nous avons trouvé que les écarts des courbes étaient très faibles. (Cela doit dépendre de la nature respective de ces deux métaux.)

Le cuivre se tient à une distance moitié de celle du fer. Ainsi, pour la réduction $1^{mm},4$, le fer exige 60^{kg} par unité de surface; le cuivre exige 28^{kg}.

A $0^{mm},5$, le fer exige 126^{kg}, le cuivre 66, soit pratiquement la moitié. Ce rapport est assez voisin du rapport des résistances du fer et du cuivre aux premières déformations par compression, soit $\frac{40}{20} = 2$; il correspondrait assez à la résistance du fer à froid et à celle du fer au rouge cerise.

Pour le fer et le laiton, les rapports de résistance d'étirage sont moyennement :

réductions $1^{mm},6 : \frac{56^{kg}}{42}$, $\quad 0^{mm},5 : \frac{126}{90}$, soit $\frac{4}{3}$.

Pour le laiton et le cuivre, on a :

réductions $1^{mm},6 : \frac{42}{24} = \frac{7}{4}$ $\quad 0^{mm},5 : \frac{90}{66} = \frac{4}{3}$.

Pour le plomb, les résistances et surtout les frottements sont faibles, ce qui donne à l'étirage un grand rendement comparativement aux autres métaux. Par rapport au cuivre, le plomb exige de vingt à vingt-cinq fois moins de force pour l'étirage dans les conditions des essais.

L'étirage du plomb n'a qu'un intérêt relatif; cependant, les essais montrent qu'il n'a pas été possible d'obtenir, avec ce métal mou, des réductions totales aussi fortes qu'avec les métaux tenaces moins malléables.

Le plomb de $6^{mm},50$ de diamètre se rompt à la réduction à 5,52, alors que le cuivre ne se rompt qu'en passant de 7,05 à 5,03, que le laiton et le fer supportent les réductions 7,05 et 5,42.

D'ailleurs, la relation indiquée précédemment

$$d' = d\sqrt{\frac{R_e}{R + R_e}}$$

indique bien que le diamètre d' pourra être d'autant plus réduit que la valeur du radical sera plus petite, valeur qui décroît avec la somme des résistances de traction et d'étirage.

Pour le cas où l'on supposerait $R_e = R$, il viendrait

$$d' = d\sqrt{\frac{1}{2}} = 0{,}76\ d.$$

Or R_e est généralement, pour ne pas dire toujours, plu grand que R; il s'ensuit donc que la limite de réduction maximum serait voisine de $d' = 0{,}76d$, soit $d - d' = 0{,}24d$.

Pour le cuivre, cette valeur se vérifie très bien, car on a pour le passage n° 24, où il y a rupture,

$$d = 7{,}05 \qquad d' = 5{,}03;$$

$$d' = 5{,}03 \leqq 0{,}76d = 0{,}76 \times 7{,}05 = 5{,}3.$$

Il faut remarquer que quand il y a traction voisine de la rupture, le frottement dans la partie cylindrique n'existe plus, du fait de la réduction de diamètre, et que cette relation s'applique aux divers types de filières ordinaires.

Pour le laiton et pour le fer, les essais n° 2 et n° 3 montrent que la réduction à $5{,}42 > 5{,}3$ n'a pas déterminé la rupture; mais les résistances de 38^{kg} du laiton et de 40^{kg} pour le fer, qui se produisent au passage n° 21, permettent d'inférer que la rupture serait voisine de la réduction 5,3. (Dans un autre essai, nous avons trouvé la rupture pour la réduction de 7,06 à 5,56.)

Il s'ensuivrait que, pour ces métaux, la résistance R_e serait égale à R pour la réduction maximum.

Dans d'autres essais, nous relevons les chiffres suivants se rapportant au cas de rupture :

Fil de fer recuit : $\frac{d'}{d} = \frac{1,81}{2,55}\ \frac{1,60}{1,95}\ \frac{1,29}{1,81}\ \frac{0,98}{1,29} \gtrless 0,76$;

Laiton : $\frac{1,14}{1,48}\ \frac{3,48}{3,82}\ \frac{5,56}{7,06}\ \frac{4,35}{5,56}\ \frac{3,34}{4,35}\ \frac{2,64}{3,34}\ \frac{1,87}{2,64}\ \frac{1,82}{2,50}$;

Acier doux recuit : $\frac{5,8}{7,5}\ \frac{4,1}{5.6}\ \frac{3,05}{4,1}$.

Essais nos 6 à 8 sur du fer.

Parmi les essais sur plus forts diamètres que nous avons faits, nous signalons ceux nos 6, 7, 8 qui ont porté sur des réductions de $1^{mm},2$ (essai n° 6), $6^{mm},3$ (n° 7), $1^{mm},05$ (n° 8).

L'essai n° 1 fait ressortir la faible valeur du frottement dans le type de filière employée, laquelle était à bords très arrondis.

Le coefficient de résistance pour les essais n° 6 et n° 8 est voisin de 125^{kg}, valeur que l'on peut moyennement admettre en pratique lorsque le frottement est négligeable sur la partie cylindrique du mandrin, et quand la réduction atteint 1^{mm}.

L'essai n° 7 devait donner une réduction de $6^{mm},3$ en diamètre. L'éprouvette s'est rompue alors que l'étirage s'était produit en partie.

Le coefficient de résistance était abaissé à 43^{kg}, montrant bien toute l'importance des fortes réductions.

La rupture nous permet de déduire le rapport limite des diamètres, soit $\frac{18^{mm},3}{24^{mm},6} = 0,73$, voisin de 0,76, que nous avons trouvé précédemment comme limite moyenne de l'étirage direct.

Essais nos 9 à 11.

Les essais nos 9 à 11 se rapportent à des tuyaux de cuivre étirés sur un banc à tirer de chaudronnerie dans les conditions ordinaires de la pratique.

Ici également, nous avons simplement cherché à connaître

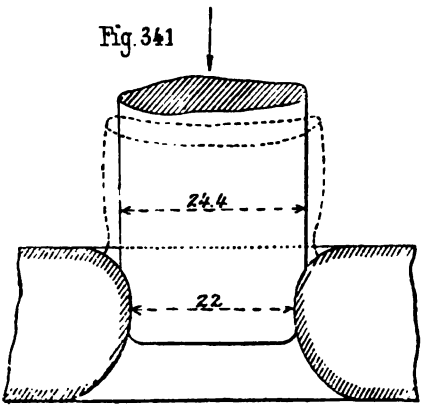
le coefficient de résistance d'étirage pour lequel nous avons trouvé 148kg, 158kg et 184kg. On peut remarquer que les épaisseurs des tuyaux augmentent légèrement par le passage à la filière, quelques centièmes de millimètre.

Ces essais ne sont pas assez nombreux pour déterminer les variations des éléments, il conviendrait de les reprendre et de les étendre à toute une série de diamètres et de réductions variables analogues à celles des fils, ce que nous n'avons pu faire.

Essais d'étirage par compression.

Si, au lieu de tractionner l'éprouvette pour la faire passer à travers la filière, on la soumet à une poussée, la pénétration ou étirage se fera par compression. Ce procédé s'applique au dégrossissage lorsque les manchons ne sont pas trop longs. Il est beaucoup moins avantageux que l'étirage par traction ainsi qu'il résulte des essais nos 1, 2, 3 et suivants.

Fig. 341



L'éprouvette tendant à se comprimer avant de pénétrer, son diamètre se renfle plus ou moins jusqu'à ce que l'effort de pénétration soit devenu constant; ce qui dépend encore de la longueur de la partie cylindrique du mandrin, longueur qu'il convient tout particulièrement de réduire avec ce procédé.

L'essai n° 1 montre, tout d'abord, que pour un rapport de diamètre égal à 0,90, la pénétration ne peut se faire *(fig. 341)*. Or, le rapport limite d'étirage par traction est voisin de 0,76.

Étirage par poussée

NUMÉRO D'ORDRE de l'essai	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	DIMENSIONS DIAMÉTRALES			SECTIONS		
		DIAMÈTRE primitif	DIAMÈTRE d'étirage	RÉDUCTION diamétrale	PRIMITIVE	D'ÉTIRAGE	RÉDUCTION
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Éprouvette de fer.	24,4	22	2,4	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
2		20,1	18,5	1,6	317	269	48
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	
3		23,2	21,7	1,3	423	369,8	53,2
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
4	Éprouvette de fer comme dito.	13,8	12,9	0,9	149	130	19
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
	Démanchement de l'éprouvette.	»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»

travers le mandrin.

Tableau n° 31. — A.

EFFORT de poussée en kilogram.	LONGUEUR emboîtée	PRESSION par mm² de réduction de section	DÉMANCHEMENT			OBSERVATIONS
			EFFORT	LONGUEUR déboîtée	EFFORT par mm²	
9	10	11	12	13	14	15
8.600	»	»	»	»	»	1mm d'enfoncement.
à						L'éprouvette s'est comprimée, et n'a
23.500	»	»	»	»	»	pu passer dans le trou du mandrin.
						Rapport $\frac{22}{24,4} = 0,90$.
6.000	1	124	»	»	»	A partir de 12.500kg, l'éprouvette s'est
7.900	2	165	»	»	»	comprimée, a pénétré de 4 à 5mm, s'est
10.200	3	212	»	»	»	raccourcie d'autant, et sous la charge de
11.500	4	240	»	»	»	20.000kg, la filière s'est brisée.
12.500	5	260	»	»	»	A 20.000kg, l'éprouvette subissait un
à						effort de compression par millimètre
20.000	»	»	»	»	»	carré d'environ 50kg. Rapport $\frac{18,5}{20,1} = 0,92$.
7.600	1	146	»	»	»	
8.400	2	161	»	»	»	
9.400	3	180	»	»	»	Rapport $\frac{21,7}{23.2} = 0,94$.
10.400	4	200	»	»	»	
11.000	5	210	»	»	»	
11.600	6	223	»	»	»	
12.000	7	230	»	»	»	
12.200	8	230	»	»	»	
12.200	9	230	»	»	»	
2.650	1	140	»	»	»	Une éprouvette de dimensions égales
3.000	2	192	»	»	»	a donné lieu à un refoulement très pro-
3.900	3	200	»	»	»	noncé, indiquant que la limite permet-
4.000	4	232	»	»	»	tant l'enfoncement est voisine du dia-
4.800	5	252	»	»	»	mètre 12,9.
5.400	6	284	»	»	»	Soit un rapport $\frac{12,9}{13,8} = 0,93$.
5.400	7	»	»	»	»	
5.400	8	»	»	»	»	
»	»	»	650	1	34	
»	»	»	500	2	26	
»	»	»	400	5	21	

Étirage par poussée à

NUMÉRO D'ORDRE de l'essai	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	DIMENSIONS DIAMÉTRALES			SECTIONS		
		DIAMÈTRE primitif	DIAMÈTRE d'étirage	RÉDUCTION diamétrale	PRIMITIVE	D'ÉTIRAGE	RÉDUCTION
1	2	3	4	5	6	7	8
5	Éprouvette de fer.	11,6	10,85	0,75	106	92	14
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
	Démanchement.	»	»	»	»	»	»
6	Éprouvette de fer.	13,6	12	1,6	145	113	32
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
7	Id.	11	10,8	0,2	95	91	4
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
	Démanchement.	»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
8	Éprouvette de fer.	47,3	46,85	0,45	1.757	1.720	37
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»
9	Id.	47,0	46,8	0,2	1.735	1.720	15
		»	»	»	»	»	»
		»	»	»	»	»	»

travers le mandrin.

Tableau n° 31. — *B.*

EFFORT de poussée en kilogram. 9	LONGUEUR emboîtée 10	PRESSION par mm² de réduction de section 11	DÉMANCHEMENTS EFFORT 12	DÉMANCHEMENTS LONGUEUR déboîtée 13	DÉMANCHEMENTS EFFORT par mm² 14	OBSERVATIONS 15
1.800	1	128	»	»	»	Rapport $\frac{10,85}{11,6} = 0,94$.
2.000	2	142	»	»	»	
2.060	3	148	»	»	»	
2.500	4	178	»	»	»	
2.700	5	193	»	»	»	
2.700	6	193	»	»	»	
2.700	7	193	»	»	»	
»	»	»	400	»	28	
4.000	1	125	»	»	»	L'éprouvette s'écrase.
5.200	2	162	»	»	»	
6.000	3	187	»	»	»	Rapport $\frac{12}{13,6} = 0,88$.
300	1	74,5	»	»	»	Rapport $\frac{10,8}{11} = 0,98$.
500	2	124	»	»	»	
900	5	225	»	»	»	
1.200	9	300	»	»	»	
1.200	10	300	»	»	»	
»	»	»	500	1	124	
»	»	»	400	2	100	
»	»	»	300	6	74,5	
»	»	»	300	10	74,5	
»	»	»	300	15	74,5	
8.000	1	215	9.000	1	240	Effort d'étirage moyen . . . . 350kg Effort de frottement moyen. . 200 Effort utile 150
10.000	4	270	6.800	3	184	
13.000	14	350	5.000	8	135	
13.000	24	350	3.000	23	80	Rapport $\frac{46,85}{47,3} = 0,985$.
13.000	38	350	»	»	»	
6.000	2	400	5.000	1	334	Effort d'étirage. . . . . 400kg Frottement moyen. . . . . 300 Effet utile. 100
6.000	4	400	4.000	9	267	
6.000	30	400	4.000	25	267	Rapport $\frac{46,8}{47} = 99,2$.

Nous avons vu que l'éprouvette n° 7 de traction de $24^{mm},6$ aurait pu être réduite en un seul passage à $18^{mm},5$, tandis que la réduction à 22^{mm} ne peut se faire par compression; soit une différence d'étirage de $22^{mm} - 18^{mm},5 = 3^{mm},5$.

Dans l'essai n° 2, nous trouvons la limite du rapport pour les diamètres $20^{mm},1$ et $18^{mm},5$ donnant $\frac{18^{mm},5}{20^{mm},1} = 0,92$.

L'essai n° 3 a donné un résultat convenable, mais on peut remarquer que le coefficient de résistance à l'étirage est sensiblement plus élevé que pour un essai analogue d'étirage par traction. Il conviendrait, d'après cet essai, de ne pas descendre au-dessous d'un rapport de diamètre égal à 0,94, ce que confirment les essais n°s 4 et 5, tandis que l'essai n° 6, comportant un rapport 0,88, a déterminé l'écrasement de l'éprouvette. Après chacun de ces essais, nous mesurions les efforts de démanchement, ce qui nous donnait le frottement sur la partie cylindrique du mandrin.

Ici de nouveau, avec de fortes réductions, le frottement était relativement moins élevé qu'avec les faibles réductions, le coefficient de frottement d'étirage étant rapporté au millimètre carré de section de réduction.

C'est particulièrement dans les essais n°s 8, 9, les diamètres étant de 47^{mm}, que le frottement prend une valeur considérable, parce que, pour de forts diamètres, on augmente la longueur de la partie cylindrique.

Ainsi, dans l'essai n° 8, réduction faible, on constate que l'effort utile n'est que 150^{kg}, l'effort de frottement étant de 200^{kg}.

La différence est encore plus grande dans l'essai n° 9 où on trouve : effort utile 100^{kg}, effort de frottement 300^{kg}.

Ces chiffres montrent bien que l'étirage des grosses barres à froid exige une grande puissance et que le rendement mécanique est très réduit. Le procédé d'étirage à froid des barres de gros diamètre ne saurait s'appliquer économiquement qu'à des réductions faibles ayant simplement pour but de calibrer les pièces.

Essais d'étirage au mandrin filière avec mandrin pousseur.

Tableau n° 32 *A*.

DÉSIGNATION de L'ÉPROUVETTE	NUMÉROS D'ORDRE des passages successifs.	DIAMÈTRE DE LA MATRICE et du mandrin.	SECTION DE LA MATRICE et du mandrin.	DIFFÉRENCE des sections.	DIFFÉRENCE DES SECTIONS de l'éprouvette.	HAUTEUR de l'éprouvette.	ENFONCEMENT	CHARGE	RÉSISTANCE par mill. car. de réduction de section.
Éprouvette de cuivre emboutie au premier passage. Diamètre de la rondelle 45mm. Épaisseur 3mm. Enfoncement brusque à 20mm.	1	33,7	892	»	»	18,7	1	80	»
		»	»	361,2	»	»	2	110	»
		26	530,8	»	»	»	3	130	»
		»	»	»	»	»	4	210	»
		»	»	»	»	»	5	280	»
		»	»	»	»	»	6	380	»
		»	»	»	»	»	7	430	»
		»	»	»	»	»	8	600	»
		»	»	»	»	»	9	800	»
		»	»	»	»	»	10	1.200	»
		»	»	»	»	»	11	1.350	»
		»	»	»	»	»	12	1.660	»
		»	»	»	»	»	13	1.860	»
		»	»	»	»	»	14	2.160	»
		»	»	»	»	»	15	2.200	»
		»	»	»	»	»	16	2.200	»
		»	»	»	»	»	17	2.200	»
		»	»	»	»	»	18	2.100	»
		»	»	»	»	»	19	1.700	»
		»	»	»	»	»	20	1.500	»
Enfoncement brusque ap. 8mm.	2	32,3	819,4	»	»	»	1	700	»
		»	»	316,6	44,6	19	2	1.100	»
		25,3	502,8	»	»	»	3	1.100	24,6
		»	»	»	»	»	4	1.100	»
		»	»	»	»	»	5	1.000	»
		»	»	»	»	»	6	900	»
		»	»	»	»	»	7	850	»
		»	»	»	»	»	8	800	»
Enfoncement brusque ap. 5mm.	3	31	756,6	»	»	»	1	500	»
		»	»	304,2	12,4	20	2	700	»
		24	452,4	»	»	»	3	750	68,5
		»	»	»	»	»	4	850	»
		»	»	»	»	»	5	700	»
	4	30	708,7	»	»	»	1	440	»
		»	»	293,2	11	20,5	2	540	»
		23	415,5	»	»	»	3	650	»
		»	»	»	»	»	4	650	»
		»	»	»	»	»	5	700	»
		»	»	»	»	»	6	750	68,5
		»	»	»	»	»	7	700	»
		»	»	»	»	»	8	650	»

Essais d'étirage au mandrin filière avec mandrin pousseur.

Tableau n° 82 *B*.

DÉSIGNATION de L'ÉPROUVETTE	NUMÉROS D'ORDRE des passages successifs.	DIAMÈTRE DE LA MATRICE et du mandrin.	SECTION DE LA MATRICE et du mandrin.	DIFFÉRENCE des sections.	DIFFÉRENCE DES SECTIONS de l'éprouvette.	HAUTEUR de l'éprouvette.	ÉPROUVEMENT	CHARGES	RÉSISTANCE par mill. car. de résection de section.
Éprouvette de cuivre emboutie au premier passage. Diamètre de la rondelle 45mm. Épaisseur 3mm.	5	29,2 » 22,5 »	669,7 » 397,6 »	» 272,1 »	» 21,1 »	» 21,5 »	1 2 3 4 5 6 7 8 9	550 680 680 720 820 820 720 620 500	» » » » » 39 » » »
	6	28,4 » 21,5 »	633,5 » 363 »	» 270,5 »	» 1,6 »	» 22 »	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15	450 660 680 680 760 760 760 760 760 680 650 620 600 560 500	» » » » 47,5 » » » » » » » » » »
	7	27 » 21 »	572,6 » 347,6 »	» 225 »	» 55,5 »	» 22,5 »	1 2 3 4 5 6 7 8 9 à 15 16 17	400 450 480 470 480 500 520 540 540 400 300	» » » » » » » » 9,7 » »
	8	26 » 20 »	530,9 » 314,2 »	» 216,7 »	» 8,3 »	» 23 »	1 2 3 4	500 720 720 600	» 86 » »

Essais d'étirage au mandrin filière avec mandrin pousseur.

Tableau n° 32 *C.*

DÉSIGNATION de L'ÉPROUVETTE	NUMÉROS D'ORDRE des passages successifs.	DIAMÈTRE DE LA MATRICE et du mandrin.	SECTION DE LA MATRICE et du mandrin.	DIFFÉRENCE des sections.	DIFFÉRENCE DES SECTIONS de l'éprouvette.	HAUTEUR de l'éprouvette.	ENFONCEMENT	CHARGES	RÉSISTANCE par mill. car. de réduction de section.
Éprouvette de cuivre emboutie au premier passage. Diamètre de la rondelle 45mm. Épaisseur 3mm.	9	25	491	»	»	»	1	940	»
		»	»	176,8	39,9	25	2	1.520	»
		20	314,2	»	»	»	3	1.680	»
		»	»	»	»	»	4	1.960	»
		»	»	»	»	»	5	2.200	»
		»	»	»	»	»	6	2.300	»
		»	»	»	»	»	7	2.480	»
		»	»	»	»	»	8	2.540	»
		»	»	»	»	»	9	2.540	»
		»	»	»	»	»	10	2.560	»
		»	»	»	»	»	11	2.560	»
		»	»	»	»	»	12	2.560	»
		»	»	»	»	»	13	2.600	»
		»	»	»	»	»	14	2.620	65,5
		»	»	»	»	»	15	2.600	»
		»	»	»	»	»	16	2.200	»
		»	»	»	»	»	17	1.900	»
	10	24	452,4	»	»	»	0,5	700	»
		»	»	138,2	38,6	32	1	2.000	»
		20	314,2	»	»	»	2	2.500	»
		»	»	»	»	»	3	2.850	»
		»	»	»	»	»	4	2.950	»
		»	»	»	»	»	5 à	2.960	»
		»	»	»	»	»	13	2.960	76
		»	»	»	»	»	14	2.850	»
		»	»	»	»	»	18	2.740	»
		»	»	»	»	»	19	2.600	»
		»	»	»	»	»	20	2.500	»
		»	»	»	»	»	21	2.400	»
		»	»	»	»	»	22	2.600	»
Après recuit de l'éprouvette.	11	23	415,5	»	»	»	0,5	400	»
		»	»	101,3	36,9	41	1	920	»
		20	314,2	»	»	»	2	1.980	»
		»	»	»	»	»	3	2.600	»
		»	»	»	»	»	4	2.650	»
		»	»	»	»	»	5 à	2.700	»
		»	»	»	»	»	31	2.700	73
		»	»	»	»	»	32	2.500	»
		»	»	»	»	»	33	2.400	»
		»	»	»	»	»	34	3.000	»
		»	»	»	»	»	35	1.600	»
		»	»	»	»	»	37	1.100	»
		»	»	»	»	»	38	420	11,4
		»	»	»	»	»	39	410	»

Essais d'étirage au mandrin filière avec mandrin pousseur.

Tableau n° 32 *D*.

DÉSIGNATION de L'ÉPROUVETTE	NUMÉROS D'ORDRE des passages successifs.	DIAMÈTRE DE LA MATRICE et du mandrin.	SECTION DE LA MATRICE et du mandrin.	DIFFÉRENCE des sections.	DIFFÉRENCE DES SECTIONS de l'éprouvette.	HAUTEUR de l'éprouvette.	ENFONCEMENT	CHARGES	RÉSISTANCE par mill. car. de réduction de section.
Éprouvette de cuivre emboutie au premier passage. Diamètre de la rondelle 45mm. Épaisseur 3mm. Après recuit de l'éprouvette.	12	22	880,2	»	»	»	0,5	1.400	»
		»	»	66	35,3	54	1	1.950	»
		20	314,2	»	»	»	2	2.140	»
		»	»	»	»	»	3	2.140	60
		»	»	»	»	»	4	2.145	»
		»	»	»	»	»	5	2.120	»
		»	»	»	»	»	6	2.103	»
		»	»	»	»	»	7	2.050	»
		»	»	»	»	»	8	2.000	56
		»	»	»	»	»	9	1.900	»
		»	»	»	»	»	10	1.800	»
		»	»	»	»	»	11	1.800	»
		»	»	»	»	»	12	1.800	»
		»	»	»	»	»	13	1.760	»
		»	»	»	»	»	14	1.760	»
		»	»	»	»	»	15	1.760	»
		»	»	»	»	»	16	1.720	»
		»	»	»	»	»	17	1.720	»
		»	»	»	»	»	18	1.720	»
		»	»	»	»	»	19	1.720	»
		»	»	»	»	»	20	1.700	48
		»	»	»	»	»	21	1.680	»
		»	»	»	»	»	22	1.680	»
		»	»	»	»	»	23	1.660	»
		»	»	»	»	»	24	1.660	42
		»	»	»	»	»	25	1.650	»
		»	»	»	»	»	26	1.640	»
		»	»	»	»	»	27	1.630	»
		»	»	»	»	»	28	1.620	»
		»	»	»	»	»	29 à	1.620	»
		»	»	»	»	»	45	1.620	»
		»	»	»	»	»	46	1.500	»
		»	»	»	»	»	47	1.300	»
		»	»	»	»	»	48	900	»
	13	21,6	366,5	»	»	»	0,5	600	»
		»	»	52,3	13,7	»	1	820	»
		20	314,2	»	»	»	2	1.000	»
		»	»	»	»	»	3	1.200	»
		»	»	»	»	»	4	1.200	»
		»	»	»	»	»	5	1.200	87,5
		»	»	»	»	»	6 à	920	»
		»	»	»	»	»	34	920	67

Essais d'étirage au mandrin filière avec mandrin pousseur.

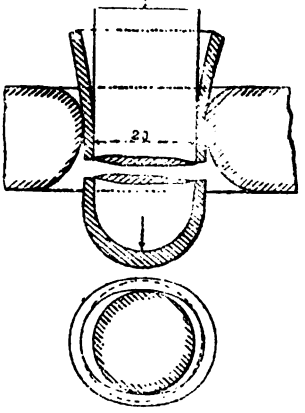
Nous signalerons seulement les essais faits avec une rondelle de cuivre emboutie.

L'embouti a été resserré sur mandrins plus petits et ensuite étiré sur pousseur de diamètre invariable.

Les résultats sont consignés dans le tableau n° 32.

On voit que l'éprouvette, après avoir été emboutie, présentait une longueur de 18^{mm},7 qui a atteint seulement 23^{mm} après réduction des diamètres primitifs 33^{mm},7-26^{mm} aux diamètres 26^{mm} et 20^{mm}.

Fig 342



Les efforts de retreignage sont sensiblement moins élevés que ceux d'étirage correspondant aux passages 9 à 13 et qui permettent seuls de faire ressortir, avec exactitude, la résistance par millimètre carré de réduction de section.

La résistance maximum dans chaque passage successif pour des réductions à très peu près égales, varie entre 65 et 75^{kg}. Dès les premiers millimètres d'enfoncement, l'effort atteint sa valeur maximum, ce qui indique que la déformation se localisait à l'entrée de la filière et que le frottement n'était relativement pas élevé; la filière était arrondie sans partie cylindrique; la valeur du frottement, accusée à la fin du passage, était voisine de 10^{kg} et 15^{kg} par millimètre carré. Vers la fin du passage, la partie ouverte de l'éprouvette s'évase en prenant une forme elliptique *(fig. 342)*.

Dans le passage n° 13, la réduction étant faible, le coefficient de résistance s'est élevé à 87^{kg} par millimètre carré.

La traction maximum développée par le pousseur sur la partie dégagée de la filière, s'élevait dans le passage n° 10 à $\frac{2960}{138,2} = 21^{kg}$, valeur assez voisine de la résistance du métal à la rupture.

Il convenait donc de ne pas faire de réduction plus prononcée.

Dans un essai analogue, au dixième passage, l'éprouvette, n'ayant pas subi de recuit depuis le début, s'est arrachée brusquement à 10^{mm} du culot; les diamètres étaient: pousseur 20^{mm}, filière 22, éprouvette 23; la charge avait pris une valeur maximum de 2.660^{kg} à 5^{mm} d'enfoncement, la rupture s'est faite à 15^{mm} d'enfoncement sous un effort de 1950^{kg}, soit une résistance par millimètre carré de section de 30^{kg}.

Cette rupture indiquait la limite que pouvait atteindre le métal sans être recuit. Il en est de même des criques qui se manifestent lorsque, après plusieurs passages, le métal s'est fortement écroui. On a soin, pour éviter ces défauts et pour permettre de fortes réductions de dégrossissage, de recuire après chaque passage.

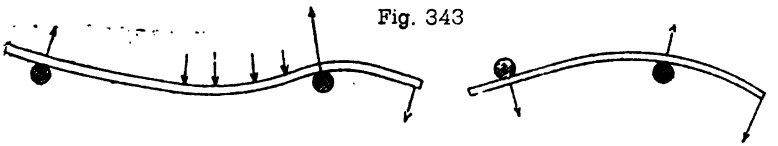
CHAPITRE VI

Procédés par flexion.

La flexion progressive au delà de la limite d'élasticité du métal permet de façonner les pièces dites ployées, courbées. redressées, coudées, pliées, cannelées, cintrées, décintrées ou dressées, enroulées, embouties, estampées.

Les dimensions transversales des pièces sont peu modifiées si la flexion n'est pas prononcée *(fig. 343)*. Si la flexion est grande *(fig. 344)*, et le rayon de courbure petit par rapport à l'épais-

Fig. 343



seur ou à la dimension dans le sens de ce rayon, la section se transforme sensiblement. Ainsi dans une pièce à section rectangulaire, le métal est fortement comprimé du côté intérieur et la surface devient convexe; du côté extérieur, la surface devient concave, les fibres s'allongent, il y a tendance à la formation de déchirures, de criques.

Ployage, courbage.

Les pièces ployées, courbées, sont celles dont la courbure, plus ou moins uniforme, s'étend sur une grande partie de la longueur. Ordinairement, il suffit de placer la pièce sur ou entre deux appuis rigides et d'exercer une pression continue au milieu ou en un point quelconque pour produire une partie

Essais de ployage.

Tableau n° 33 A.

N° D'ORDRE	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	FLÈCHE	CHARGES successives	MOMENT de ployage au milieu M	TENSION OU COMPRESSION des fibres extérieures $R = \frac{Mn}{I}$	COEFFICIENT de ployage réel ou fictif $E = \frac{PL^3}{48\,f\,I}$	OBSERVATIONS
1	Éprouvette de fer cylindrique de 36mm de diamètre.	1/2	3.500	175.000	38,3	14.124	Distance entre les appuis L = 200mm Moment de ployage au milieu $M = \frac{PL}{4}$.
		1	4.400	220.000	48,2	8.800	
		2	5.000	250.000	54,8	5.000	
		3	5.300	265.000	57,0	3.530	
		4	5.600	280.000	61,2	2.800	
		5	5.900	294.000	64,6	2.360	
		6	6.200	310.000	67,9	2.090	
		7	6.350	317.500	69,5	1.814	Moment d'inertie de la section $I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{3{,}14 \times 36^4}{64} = 82.406.$
		8	6.500	325.000	71,1	1.625	
		9	6.600	330.000	72,1	1.466	
		10	6.700	335.000	73,2	1.340	
		11	6.800	340.000	74,4	1.236	
		12	7.000	350.000	76,7	1.166	
		13	7.150	355.000	77,8	1.090	Module de section $\frac{I}{n} = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{3{,}14 \times 36^3}{32} = 4.577.$
		14	7.200	360.000	78,9	1.030	
		15	7.300	365.000	79,9	970	
		16	7.400	370.000	81,0	925	
		17	7.500	375.000	82,1	882	
		18	7.500	375.000	82,1	833	
		10	7.500	375.000	82,1	789	
		20	7.600	380.000	83,2	760	
		21	7.600	380.000	83,2	724	
		22	7.600	380.000	83,2	690	
		23	7.630	381.500	83,3	663	
		24	7.670	383.500	83,7	640	
		25	7.710	385.500	84,2	610	
		26	7.750	387.500	85,0	597	
		27	7.780	389.005	85,1	578	
		28	7.810	390.500	85,6	563	
		29	7.830	391.500	85,8	542	
		30	7.850	392.500	86,0	524	Tension ou compression réelle ou fictive des fibres extérieures dans la section du milieu $R = \frac{Mn}{I} = \frac{M}{4.577}$.

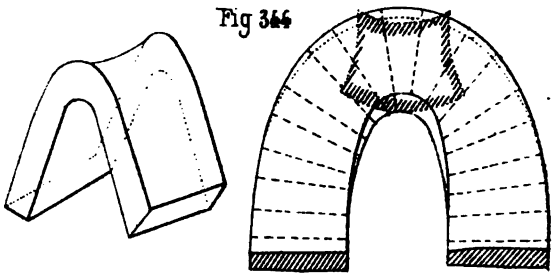
Essais de ployage.

Tableau n° 33 *B.*

N° D'ORDRE	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	FLÈCHE	CHARGES successives	MOMENT de ployage au milieu M	TENSION OU COMPRESSION des fibres extérieures $R = \frac{Mn}{I}$	COEFFICIENT de ployage réel ou fictif $E = \frac{PL^3}{48fI}$	OBSERVATIONS
2	Éprouvette de fer de section carrée 40 × 40.	1/2	6.000	300.000	28,2	10.660	$L = 200^m$.
		1	7.000	375.000	35,2	5.770	$M = \frac{PL}{4}$.
		2	8.500	425.000	39,8	3.325	
		3	9.500	475.000	45,1	2.473	
		4	10.300	515.000	48,4	2.010	$I = \frac{C^4}{12} = \frac{\overline{40}^4}{12} = 213.333.$
		5	10.900	545.900	51,2	1.704	
		6	11.500	577.000	54,0	1.473	$\frac{I}{n} = \frac{C^3}{6} + \frac{\overline{40}^3}{6} = 10.666.$
		6	11.700	585.000	55,0	1.308	
		8	12.000	600.000	51,3	1.172	
		9	12.500	625.000	58,6	1.084	$R = \frac{Mn}{I} = \frac{M}{10.666}$.
		10	13.000	650.000	61,0	1.017	
		11	13.200	660.000	11,8	937	$E = \frac{PL^3}{48fI}$.
		12	13.500	675.000	63,3	882	
		13	13.700	685.000	64,2	824	
		14	13.700	685.000	64,2	765	
		15	13.900	695.000	65,1	726	
		16	14.000	700.000	65,7	680	
		17	14.000	700.000	65,7	644	
		18	14.000	700.000	65,7	618	
		19	14.000	700.000	65,7	517	

de la déformation ; puis la pièce est changée de position et la pression ou traction s'exerce de nouveau.

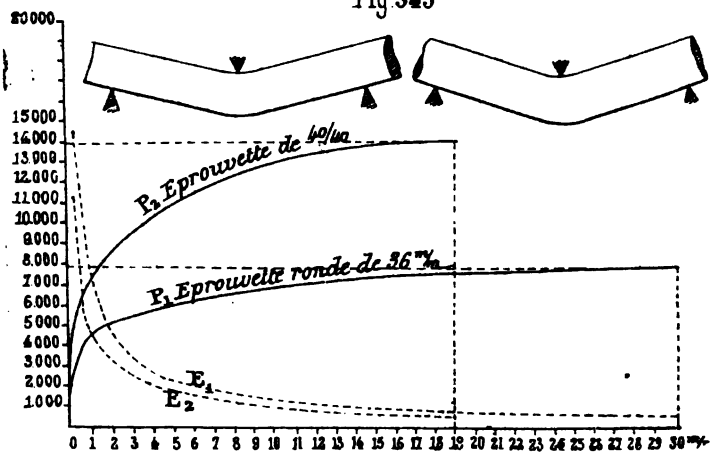
Fig 344



L'effort moyen nécessaire se calcule assez approximativement en appliquant la relation connue du moment fléchissant

$$M = \frac{RI}{n} = \frac{EI}{\rho}.$$

Fig 345



Cette relation de résistance suppose que la limite d'élasticité du métal n'est pas dépassée, ce qui n'est pas le cas puisque la déformation persiste. Cependant, pour la pratique, elle peut suffire si on a soin de donner à R et à E des valeurs déduites

d'essais de ployage qui déterminent des courbures analogues à celles que l'on doit obtenir.

La variation des moments de ployage et des efforts qui y correspondent, pour une même longueur entre les appuis, tend vers une valeur à peu près constante dès que la déformation s'accuse, ainsi que l'indiquent les éléments du tableau n° 33 et la *figure 345*. Le tableau fait ressortir, que pour du fer soudé, les valeurs fictives ou réelles à attribuer au coefficient de résistance R peuvent être comprises entre 25 et 100^{kg}, et celles à donner au coefficient de ployage E varient entre 15.000 et 500.

Dans l'essai n° 2, l'allongement maximum proportionnel final des fibres extérieures s'élevait à $\frac{2,2}{10} = 0,22$, correspondant pour cette variété de fer à une résistance réelle de traction directe, c'est-à-dire, rapportée à la section sous charge, voisine de 50^{kg}, de sorte que, dans le cas ci-dessus, les valeurs maxima fictives de R diffèrent quelque peu des valeurs réelles.

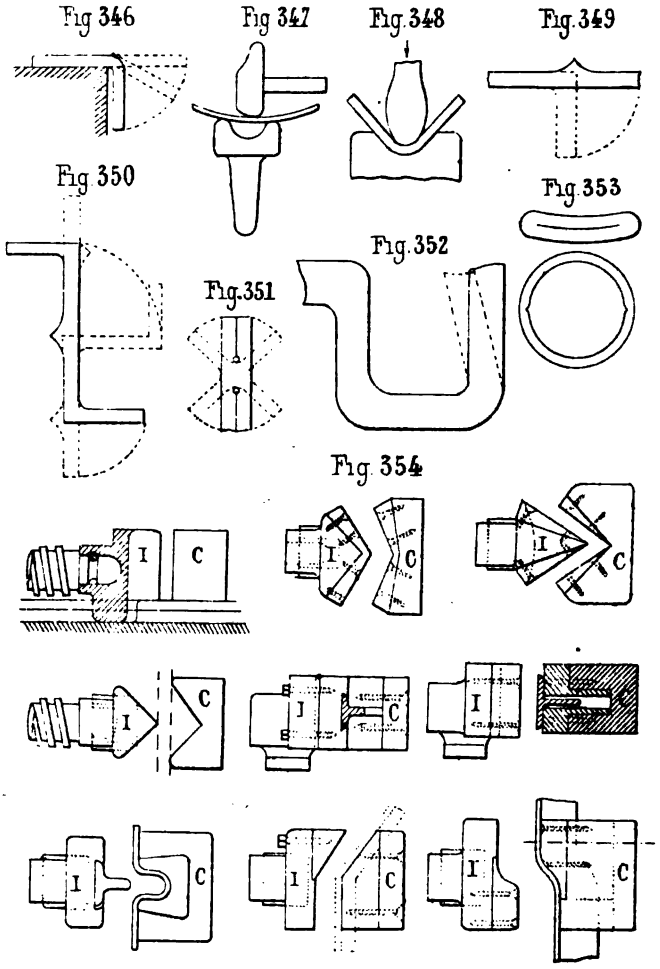
L'estimation de l'énergie de ployage n'offre pas grand intérêt pour le praticien; l'opération a lieu d'une façon intermittente et plus ou moins régulière.

Le ployage ou courbage est souvent exécuté, pour les petites pièces, à l'enclume et au marteau, le forgeron opérant progressivement à froid ou à chaud sur la bigorne ronde.

Les petits échantillons se courbent entre les deux branches d'un mandrin dit griffe *(fig. 1, pl. XXXVII)*, saisie entre les mors d'un étau; l'ouvrier agit sur la pièce directement en prenant un bras de levier suffisant, ou bien il agit avec un levier spécial dit clef à couder. La *figure 1* montre divers types de griffes s'adaptant à l'enclume, à l'étau ou à tout autre engin de tenue. La *figure* 2 montre une griffe à branches articulées très commodes pour plier les petites pièces à l'étau par le rapprochement des branches.

Pour les moyennes pièces et les tuyaux, la pièce prend appui sur deux chevilles ou blocs à faces arrondies que l'on déplace

à volonté sur un tas de fonte percé de nombreux trous *(fig. 3)*. Si la pièce n'est pas assez longue pour former bras de levier



suffisant, on y adapte une prolonge reliée parfois par une corde au tambour d'un treuil ou au crochet d'un palan, engin auxiliaire employé lorsqu'il faut développer un grand effort.

On adopte encore divers types de presses à leviers, à excentriques, à vis, à pression hydraulique, etc. La *figure 4* représente une presse ordinaire à excentrique *c* montée sur un arbre vertical actionné par un levier. Le tas d'appui de la pierre est pourvu de nombreux trous recevant les broches d'appui.

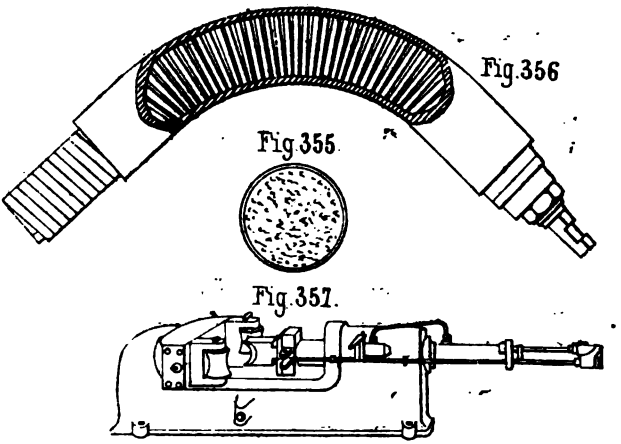
Le ployage se fait avec plus de sûreté à l'aide d'une pression régulière, réglable à volonté, développée par une vis actionnée au moyen d'un levier, disposition des machines *(fig. 5, 6, 7, 8)* utilisées particulièrement sur les chantiers de montage. Les machines fixes *(fig. 9, 10, 11)*, plus commodes et plus puissantes, sont employées pour tous travaux courants. Le volant permet d'emmagasiner une énergie qui se dépense rapidement pendant la déformation et donne lieu à l'effort, relativement grand, nécessaire. (Effort qu'on déduit approximativement de la relation $\frac{MV^2}{2} = EF$.)

Pour le courbage des grosses pièces exigeant un grand effort, il convient d'opérer à la presse hydraulique disposée comme *figure 12*. La pièce est placée sur deux rouleaux GG′ qui se règlent en hauteur à volonté, et contre deux butoirs BB′ dont l'écartement symétrique ou dissymétrique par rapport à l'axe de la machine est obtenu à volonté également par la manœuvre des vis de déplacement. La tête du piston hydraulique actionne la butée A vers la pièce à ployer. La coupe *(fig. 13)* montre la disposition du cylindre hydraulique et des pistons d'action B et de retour E. Des petites presses hydrauliques telles que celle *figure 14* sont aussi appliquées aux pièces de chantier.

Coudage.

La pièce est dite coudée lorsque la flexion, plus ou moins prononcée, est localisée *(fig. 346)*. Dans ce cas, l'opération est faite, le plus souvent, au marteau, à la chasse, à l'étampe à couder *(fig. 347* et *348)*.

Lorsque l'angle extérieur du coude d'une barre doit être à arête, il convient, pour faciliter l'exécution, de façonner une ébauche *(fig. 349)*, laissant du côté du sommet un excès de métal suffisant pour ne pas être tenu de refouler l'angle. Ceci s'applique particulièrement aux pièces telles que : cadres, équerres, arbres coudés, essieux, qui présentent plusieurs coudes que l'on forme successivement *(fig. 350)*.

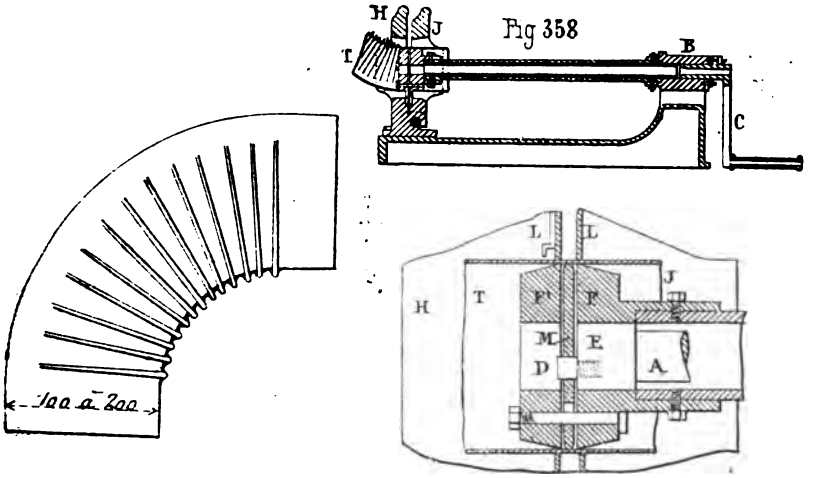


S'il s'agit de croisillons, il convient *(fig. 351)* de fendre les branches dans un morceau de dimensions capables, en ayant soin de percer des trous d'arrêt; puis on écarte les parties en ménageant des congés de raccord. Ce procédé est préférable à celui qui consiste à souder les branches.

Dans tout coudage, il faut surtout éviter de faire l'angle des branches trop petit, ce qui conduirait à l'ouvrir et donnerait grand risque de produire une déchirure à l'intérieur *(fig. 352)*. si le raccordement est de trop faible rayon.

Le contre-pliage ou agrandissement d'un angle doit toujours être évité, car, à l'intérieur d'un angle de faible amplitude, le métal a le plus souvent subi une forte compression; puis, en

ouvrant, les éléments voisins du sommet subissent un grand allongement relatif qui produit des déchirures. Tout procédé basé sur le contre-pliage donne lieu à des déchets. Par exemple, lorsqu'un tuyau provient d'une ébauche laminée sous la forme aplatie *(fig. 353)*, les opérations amenant la forme cylindrique déterminent des criques, malgré tous les soins que l'on peut apporter à la fabrication. L'emploi de mandrins à arêtes doit particulièrement être proscrit dans ces opérations de renflement.



Quand les pièces se répètent, le coudage s'opère à la machine, à la presse pourvue d'étampes de formes appropriées *(fig. 354)*; par exemple, pour les brides, les fers de ferronnerie, de ponts, de charpentes, etc.

Pour courber, couder des pièces creuses, telles que des tuyaux, on ne pourrait réussir si, préalablement, le tuyau n'était rempli d'une matière incompressible qui s'oppose à une déformation locale prononcée déterminant un aplatissement; de plus, le coude est toujours fortement arrondi. Pour les tuyaux en fer, on se contente de sable, chauffé ou non, suivant qu'on opère à chaud ou à froid *(fig. 355)*. Pour les tuyaux en

cuivre, on emploie de la résine que l'on coule à chaud et que l'on extrait de même; le tube peut ainsi être traité comme une barre pleine, et si des irrégularités se produisent, on les fait disparaître à petits coups de marteau ou bien, après avoir vidé le tube on y fait passer un boulet actionné par pression hydraulique.

L'emploi d'un mandrin tel que celui *figure 356* (1) est plus avantageux; il dispense d'employer la résine. Il est constitué par un ressort à boudin, en acier trempé, à section carrée, à spires très rapprochées. Pour courber un tuyau, on introduit un mandrin de diamètre correspondant dont la roideur transversale empêche tout aplatissement et dont la flexibilité permet de courber suivant un diamètre assez faible. Pour sortir le mandrin, il suffit de le tirer en le tournant au moyen d'une tige à encoche, de manière à réduire son diamètre. On opère le coudage ou ployage avec les machines précédemment signalées munies de têtes et de pièces d'appui analogues à celles de la presse hydraulique *(fig. 357)*.

Le coudage d'un gros tuyau de faible épaisseur ne peut se faire avec ces moyens simples, parce que le métal ne se comprime, ne se refoule pas du côté du petit rayon. On a été conduit à plisser cette partie du coude au moyen d'une machine telle que celle *figure 358* (2). Le tuyau T est emboîté par deux disques d'acier L, L, l'un fixé sur une tête de support H; l'autre sur un levier J. Un arbre A actionné par manivelle C, est emboîté par un mandrin à longue douille dont la tête F correspond au diamètre intérieur du tuyau, de même que la partie F', fixée sur F par des boulons. Entre F et F' est monté sur le tourillon excentré D, un disque en acier M à pourtour conique arrondi. L'excentricité du disque et de l'arbre A a pour effet de produire un pli à chaque rotation,

(1) Mandrin Orum. Exposition de Philadelphie (*Annuaire A. M.* 1877).
(2) *Engineering*, février 1881, machine de Haddan.

du côté intérieur du coude. Cette première partie de l'opération étant faite, le levier J reçoit un mouvement qui rapproche les disques extérieurs en resserrant le pli et produisant une partie de la courbure du coude.

Tel est le principe de cette machine qui est ordinairement pourvue de mécanismes auxiliaires déterminant le déplacement régulier du tuyau T après chaque opération, ainsi que nous le signalerons à la fabrication des tuyaux.

Cintrage, roulage, envirolage.

Le cintrage est un cas particulier du ployage. La courbure de la pièce est ordinairement régulière, et affecte la forme cylindrique ou conique.

Cette opération se répétant dans un grand nombre de pièces, on a été conduit à la faire mécaniquement au moyen de machines spéciales dites *machines à cintrer*.

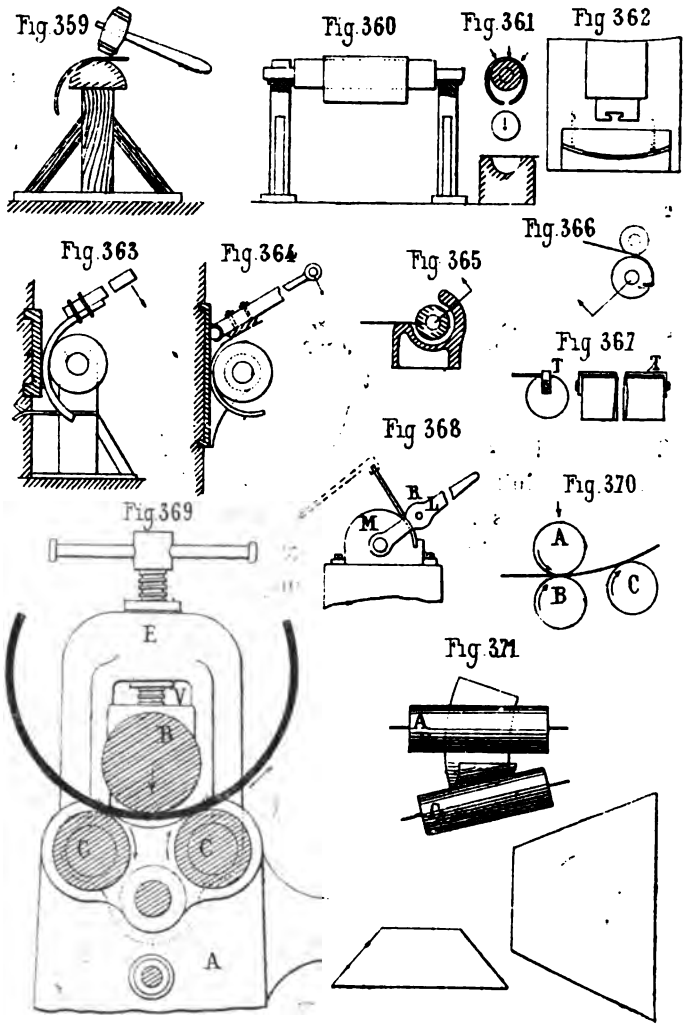
Pour les fers en barres, le cintrage plus ou moins régulier se fait, comme pour le ployage, au moyen de presses, du marteau, du maillet, de mandrins appropriés, de leviers, en opérant successivement et d'une façon intermittente.

Mais il est préférable de cintrer avec une machine opérant progressivement et d'une façon pour ainsi dire continue. Le cintrage s'applique surtout aux tôles pour chaudières, réservoirs, etc.

Il est dit roulage, envirolage lorsqu'il se rapporte aux tôles minces constituant des tuyaux formés d'une ou plusieurs viroles.

Quand on cintre au marteau ou au maillet, à froid ou à chaud, la pièce est placée sur un mandrin à chevalet, de forme circulaire et de courbure plus forte que celle à obtenir *(fig. 359)*. On peut aussi opérer dans un mandrin-étampe en laissant tomber sur la tôle un mandrin-rouleau de diamètre correspondant *(fig. 361)*, ou à l'aide d'une presse *(fig. 362)*. Le mandrin est souvent un rouleau à tourillon *(fig. 360)*.

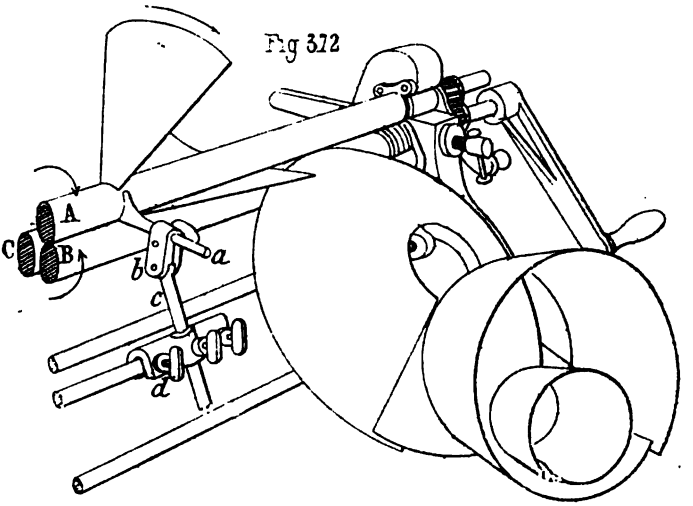
Si la pièce est suffisamment longue pour former levier, ou



si elle exige un certain effort de cintrage, en y ajoutant une prolonge, on opère par traction normale sur la pièce qui s'appuie sur le rouleau et contre une plaque de fonte ou autre arrêt

(fig. 363). L'opération se fait à plusieurs reprises en déplaçant la pièce après chaque courbure partielle donnée.

Lorsqu'il s'agit d'une tôle, on adapte sur l'arrêt d'appui un levier à traverse articulé qui est rabattu sur la tôle et courbe, cintre celle-ci sur le mandrin *(fig. 364)*. La forme est ensuite régularisée au marteau sur mandrin.



Pour le roulage des tôles minces, le rouleau présente une entaille longitudinale dans laquelle s'engage l'un des bords de la pièce *(fig. 365)*. Le rouleau est entouré d'une forme laissant un vide suffisant. Le rouleau, en tournant, roule la tôle sur lui.

En vue d'éviter le frottement sur la pièce d'appui, celle-ci est un deuxième rouleau à tourillons *(fig. 366)*.

Si la pince ne doit être déformée, il est préférable d'adapter au rouleau une traverse longitudinale T qui sert d'appui au bord de la tôle *(fig. 367)*.

Dans la disposition *figure 368*. le mandrin demi-cylindrique M est fixe; un rouleau R est monté sur un levier double L qui pivote sur les tourillons du mandrin. En actionnant les leviers

dans le sens convenable, la pièce maintenue par un rebord s'applique sur le mandrin.

Un autre procédé, basé sur l'agencement des outils, consiste à donner appui à la pièce sur deux rouleaux CC *(fig. 369)*, tournant dans le même sens; un troisième rouleau B tournant en sens inverse, se déplaçant verticalement et agissant au milieu de la portée ou distance des rouleaux CC, détermine une pression suffisante et par suite une flexion réglable à volonté par les vis d'action V. La position de ce rouleau B par rapport aux rouleaux CC règle la courbure. Celle-ci est obtenue progressivement par plusieurs passages alternatifs.

Si la pièce est en virolée, le cylindre B est disposé de manière à pouvoir facilement retirer la virole.

De nombreux types de machines à cintrer sont établis sur ce principe. Remarquons que l'entraînement de la pièce est obtenu par l'adhérence des rouleaux C, due aux réactions de la pièce sur ces rouleaux.

Parfois, l'adhérence n'étant pas suffisante, il y a glissement des rouleaux sur la pièce. Ce patinage est prévenu en adoptant des rouleaux entraîneurs cannelés, et en projetant du sable sur les parties en contact.

La somme des réactions sur les rouleaux C étant plus grande que la pression sur le rouleau B, il est préférable, pour éviter le patinage, de commander les rouleaux C; le rouleau B, se déplaçant verticalement, n'est pas commandé pour la rotation, mais il est entraîné par la pièce. Une autre disposition *(fig. 370)* consiste à serrer énergiquement la pièce entre deux cylindres A, B entraîneurs; le troisième cylindre C, pousseur, donne la courbure. Le patinage peut donc être facilement évité par le serrage suffisant de l'un des cylindres, A ou B, contre l'autre.

Cette disposition convient particulièrement pour les tôles, les pièces présentant peu d'élasticité et dont les réactions seraient trop faibles pour permettre l'entraînement dans le cas d'une machine basée sur le principe *(fig. 369)*.

Elle convient aussi pour le cintrage des viroles coniques, en obliquant le cylindre C par rapport aux deux autres *(fig. 371)*.

On conçoit que la partie du rouleau C, la plus voisine des deux rouleaux A et B, donnant lieu à une courbure plus prononcée que celle de l'autre côté, plus éloignée, la tôle prend une forme à courbure variable progressive, c'est-à-dire une forme conique d'autant plus grande que l'obliquité des rouleaux est plus forte.

La tôle est découpée préalablement suivant le développement de la paroi à obtenir.

C'est ainsi que l'on obtient toutes les pièces en forme d'entonnoir formées d'une seule tôle; c'est sur ce principe qu'est établie *(fig. 372)* la petite machine à former les pièces en abat-jour et qui peut servir de modèle pour des pièces de chaudronnerie de fortes dimensions.

Machines à cintrer les barres.

Les machines à cintrer les barres de petites dimensions sont simples et actionnées à la main, soit au moyen de leviers à encliquetage, soit mieux à l'aide d'une manivelle et roues d'engrenages.

Les rouleaux ou outils de cintrage, de même que les machines à cintrer, présentent différentes dispositions suivant la forme des barres; les rouleaux sont lissés ou cannelés pour les fers plats; ils sont à gorges pour les fers spéciaux.

Un ancien modèle à commande par leviers est représenté *(fig. 1-2, pl. XXXVIII)* (1).

Les rouleaux F sont munis de bagues H que l'on peut écarter à volonté suivant la largeur du fer profilé, telle qu'une cornière supposée placée entre les bagues. Le rouleau de pression B est établi de même. Les supports des rouleaux F sont déplaçables sur le banc pour diminuer ou augmenter leur écartement.

(1) *Portefeuille des Machines*. Septembre 1860.

Le rouleau B est déplaçable verticalement par la vis V donnant la pression de cintrage. Deux leviers L à encliquetage servent à produire la rotation intermittente du rouleau B qui entraîne la pièce et la cintre. (Ce type de machine est abandonné, nous l'indiquons à titre rétrospectif.)

La *figure 3* se rapporte à une petite machine à cintrer les fers plats, tels que ceux pour cercles de roues. Généralement, pour ces fers, les rouleaux d'appui sont cannelés suivant les génératrices, afin d'augmenter le frottement, qui doit être suffisant pour produire l'entraînement de la pièce, pour vaincre le frottement des tourillons du rouleau presseur et vaincre aussi la résistance de cintrage ou de flexion.

Si la barre est cintrée sur champ *(fig. 4)*, les rouleaux présentent des gorges maintenant bien la pièce, et, pour éviter le glissement, on projette du sable.

Si la barre à cintrer est de section à T, les rouleaux entraîneurs sont à gorge de profondeur suffisante pour y loger l'aile verticale, le rouleau presseur exerçant son action sur le plat du fer *(fig. 5)*. Il convient d'adopter des rouleaux en deux ou plusieurs parties *(fig. 6)* permettant de les utiliser pour dimensions variables. Sur les arbres des rouleaux sont montées des bagues fixées par vis. En réglant l'écartement des bagues, on peut aussi cintrer les fers à double T sur plat ou sur champ *(fig. 7)*.

Il est reconnu que la régularité du cintrage est plus facile à obtenir avec des barres double T qu'avec les fers ronds ou carrés qui souvent sont en hélice pour peu que les rouleaux soient obliques.

Les fers à ⊔ se cintrent aussi entre rouleaux à gorges *(fig. 8)* à ailes en dedans ou en dehors du cintre.

Le cintrage des cornières se fait difficilement en opérant sur une barre *(fig. 9)*, tandis qu'en cintrant deux pièces à la fois *(fig. 10)*, la section devenant symétrique, la courbure cylindrique est mieux assurée

La *figure 11* indique la manière d'opérer et de maintenir les pièces par des brides à vis.

Si le cintrage de la cornière doit être fait suivant l'angle, les rouleaux présentent la forme en V *(fig. 12)*. Dans cette machine, les rouleaux B, B' peuvent chacun occuper deux positions par rapport au rouleau A, qui est le rouleau d'entraînement devant vaincre, par son adhérence sur la barre, le frottement des rouleaux BB' et la résistance de flexion. Pour le cintrage de fers de dimensions variables, la machine présente des rouleaux à gorges multiples telles que celle *(fig. 13)* (1) qui est actionnée mécaniquement par courroies et poulies disposées pour donner le mouvement dans les deux sens à volonté. Le rouleau supérieur se déplace pour donner la pression par les vis V. Pour des fers moulurés, on adopte des cylindres de formes correspondant à celles des pièces *(fig. 14)*.

Ces petites machines, actionnées à la main ou par courroies, ne nécessitent qu'un faible effort; elles opèrent rapidement et sûrement lorsque les rouleaux sont bien parallèles; elles rendent de grands services dans les ateliers qui les utilisent. (Un effort de moins de 10^{kg} sur la manivelle d'une cintreuse permet de cintrer un bandage de 30^{mm} d'épaisseur sur 80^{mm} de largeur, avec une grande facilité, en deux ou trois passages.)

La disposition des rouleaux à axe vertical *(fig. 15)* est adoptée pour assurer un cintrage régulier, en permettant de munir la machine d'une table sur laquelle la pièce est placée et guidée de manière qu'elle ne puisse prendre la forme en hélice.

Les *figures 16* et *17* (2) se rapportent à une machine d'emploi général pour fers divers. Au lieu d'être placé sur la table, le fer s'appuie sur des rouleaux R, ce qui facilite son déplacement.

La pièce s'applique contre les rouleaux A'A''; le rouleau presseur A est rapidement amené en contact par la vis V actionnée au moyen de la manivelle M qui permet de donner

(1) Constructeur, M. Bouhey.
(2) Constructeur, M. Bouhey.

une certaine pression, que l'on augmente s'il est nécessaire en employant l'encliquetage à levier L monté sur la vis V également.

Les deux rouleaux A′ sont commandés par roues d'engrenages en relation avec les autres organes de la transmission qui permettent la rotation dans les deux sens, à volonté, par l'emploi d'une seule courroie et un jeu de trois poulies PP′P″.

Rouleuses.

Pour rouler les minces épaisseurs sur petit diamètre et sur rouleau cylindrique ou unique, la machine peut présenter la forme et les dispositons simples *(fig. 1* et *2, planche XXXIX)*.

Le rouleau A, muni d'une fente recevant la pince, est commandé à ses deux extrémités, pour éviter toute torsion, par deux roues d'engrenages en relation avec les pignons montés sur l'arbre des manivelles à main.

Parfois *(fig. 3)* le bord de la tablette est aigu au lieu d'être arrondi, ce qui permet de faire un pliage vif pour agrafe.

Pour rouler les petits tuyaux avec grande régularité, il convient d'employer la machine à rouleaux multiples *(fig. 4)*.

La bande métallique étant saisie entre les rouleaux C et D, on relève *(fig. 5* et *6)* le levier L pour amener les rouleaux BE en contact et déterminer une pression suffisante qui assure une bonne opération en appliquant fortement le métal sur le rouleau C qui forme mandrin intérieur.

Pour rouler les petites pièces coniques, la machine *(fig. 7)* comprend trois cônes ABC; la tôle passe entre A et B qui l'entraînent; le cône C, déplaçable à volonté, donne des courbures variables.

Machines à cintrer les tôles.

Le cintrage des tôles a surtout donné lieu à des dispositions spéciales qui varient suivant l'importance des pièces à mettre en œuvre. Nous n'indiquerons, ici, que celles d'emploi général; nous retrouverons les autres dans les cas d'application particuliers.

Les premières machines à cintrer les tôles de chaudières ou de réservoirs présentèrent des dispositions analogues à celles des cintreuses pour minces épaisseurs.

Il suffit de rappeler l'ancienne machine de Lemaître pour le cintrage des demi-viroles *(fig. 8* et *9)* (1).

Le demi-rouleau cintreur R, de diamètre déterminé égal à celui de la virole et rechangeable à volonté, était monté sur un rouleau A ou arbre constitué par deux manchons en fonte calés entre eux par vis, et calés sur l'arbre B par clavettes. Cette disposition permettait de démonter, au besoin, les parties pour le cintrage des diamètres réduits.

Sur l'arbre B était encore montée une barre C dont on réglait la distance au demi-rouleau R, d'après l'épaisseur de la tôle T, que l'on serrait fortement contre R. Cette tôle était placée sur une table D à rouleaux. Pendant la rotation du rouleau R, un galet G relevé au moyen de crémaillères E et de leviers F, s'appliquait sur la tôle chauffée et assurait la régularité du cintrage qui se faisait en un seul passage.

Les cintreuses actuelles sont toutes à rouleaux multiples.

La machine *(fig. 10* à *15)* (2) a été établie sur le principe de l'entraînement de la tôle par l'adhérence des deux rouleaux A et B tournant à la même vitesse en sens contraire, le troisième rouleau C produisant la poussée de flexion. Les rouleaux AB sont commandés par des roues d'engrenages de même nombre de dents. Le déplacement vertical du rouleau A est de quelques millimètres; le serrage de la tôle est produit par le serrage du rouleau au moyen des vis E s'appuyant sur les coussinets H.

La commande des cylindres A et B est faite par des roues intermédiaires et deux courroies, l'une droite, l'autre croisée, chaussant, à tour de rôle, l'une la poulie P, l'autre la poulie P', pour obtenir les deux sens de la rotation.

Pour déplacer le rouleau C, qui tourne par entraînement

(1) *Machines-outils*, par M. S. Chrétien, 1866.
(2) Modèle de Gouin.

de la tôle, les coussinets N sont poussés par les douilles-écrous des vis J; celles-ci sont actionnées par des engrenages coniques KK′ manœuvrés par les manivelles M.

Dans cette machine, le rouleau A n'est pas disposé pour permettre le cintrage de viroles entières; on ne fait que des demi-viroles.

La condition de pouvoir faire des viroles complètes est satisfaite dans la machine *(fig. 1, 2* et *3, pl. XL)* (1). Le rouleau A peut se déplacer longitudinalement, se dégager de la flasque opposée aux engrenages et permettre de retirer une virole entière.

Remarquons que le rouleau A est seul commandé; le rouleau B produit le serrage de la tôle; ses coussinets sont poussés par des vis actionnées à la main par le volant-manivelle S.

Le rouleau pousseur B′ est actionné mécaniquement par la commande à deux courroies chaussant les poulies G′GG$_1$, la poulie G calée sur l'arbre D qui transmet le mouvement aux roues hélicoïdales formant écrous des vis V′.

Afin d'éviter que le rouleau A ne dévie trop de sa direction, et n'exerce une trop forte réaction sur son support, lorsqu'on le déplace longitudinalement pour retirer la virole, certains constructeurs prolongent l'arbre de ce rouleau de manière qu'il prenne appui sur une troisième flasque. Cette disposition rend aussi la manœuvre plus facile; celle-ci se fait ordinairement avec une grue ou autre appareil de levage.

Les *figures 4* et *7* (2) se rapportent à une machine dans laquelle les rouleaux B et B′ tournent à la même vitesse dans le même sens, par la commande des engrenages I, I′ engrenant avec I″ calé sur l'arbre J en relation, par divers intermédiaires, avec le mouvement de la courroie chaussant la poulie P pour la période de repos, la poulie P′ calée sur l'arbre N pour l'une des

(1) Constructeur, M. Bouhey.
(2) Modèle Bouhey.

périodes de rotation, la poulie P″ solidaire de M″ pour l'autre période de rotation.

C'est le rouleau supérieur A qui produit la pression. Ses coussinets, en forme de collier guidé latéralement dans les flasques du bâti, s'abaissent ou s'élèvent simultanément de manière à conserver le parallélisme des rouleaux entre eux. Le déplacement vertical de A est obtenu mécaniquement ou à la main, soit par la commande au moyen d'une courroie chaussant à tour de rôle les poulies G'G″, soit à la main en manœuvrant le volant-manivelle H calé sur l'arbre F, dont le mouvement se transmet par l'arbre V_1 et par des vis sans fin aux roues V′ rapportées sur de longues douilles-écrous qui tournent dans chaque douille du bâti. Le collier de droite est à diamètre renflé permettant le déplacement longitudinal du cylindre A pour retirer les viroles entières.

Dans le cas de tôles minces, afin d'assurer un cintrage bien régulier, éviter que les abouts affectent la forme hélicoïdale, on dispose un quatrième rouleau guide E *(fig. 8)* dont la position se règle à volonté à chaque passage, à mesure que le cintrage se produit.

Ce diagramme de machine montre que le rouleau supérieur C est entraîneur, le rouleau D est serreur, le rouleur B pousseur-presseur.

Cette disposition est particulièrement avantageuse pour former des viroles coniques, le déplacement de B et de E pouvant aisément se faire de manière à rendre ces rouleaux obliques aux deux autres.

Les machines à cintrer les viroles pour chaudières ou autres récipients ont des cylindres atteignant jusqu'à 4m,500 de longueur de table, le diamètre variant de 0m,400 à 0m,600.

Pour le cintrage des plaques de blindage (épaisseur faible de 40mm à 150mm), les machines à cintrer sont de grande puissance et présentent les dispositions des *figures 9* et *10*, à commande par courroie ou à commande directe par moteur à vapeur.

Dans le cintrage des tôles, il faut avoir soin d'introduire la pièce perpendiculairement aux axes des rouleaux afin d'éviter le gauchissement.

Lorsqu'on a une série de tôles de même épaisseur devant recevoir une même courbure, on a soin de repérer la position des rouleaux pour le dernier passage.

Machines à cintrer verticales.

Pour les fortes épaisseurs et les grandes longueurs, il convient d'éviter l'action du poids de la pièce, qui s'exerce tantôt dans le sens favorable à la flexion, tantôt dans un sens défavorable, et fatigue beaucoup les rouleaux dont la rupture amènerait des accidents.

Pour satisfaire à cette condition, la machine est disposée avec des rouleaux à axes verticaux *(fig. 1, pl. IV)*.

Ces puissantes machines sont actionnées directement par un moteur à vapeur à changement de marche.

Deux des rouleaux sont entraîneurs et portent de grandes roues d'engrenages actionnées par des pignons montés sur un même arbre vertical reliés par des arbres intermédiaires à celui du moteur.

Le déplacement du troisième rouleau est obtenu par une commande auxiliaire analogue à celle des machines du type horizontal.

La *figure* 2 est une variante (1).

Les cylindres de ces cintreuses ont jusqu'à 1^m de diamètre et une hauteur de 3 à 4^m.

Avec la cintreuse verticale, la tôle se présente bien perpendiculairement à la table d'appui et le gauchissement est moins à craindre qu'avec la cintreuse horizontale.

---

(1) Modèle de MM. Smith Brothers et Cie, Glasgow.

Cintrage au mandrin.

Lorsque la tôle cintrée correspond à un angle inférieur à 180°, il est possible de faire l'opération avec un mandrin cylindrique et une forme creuse correspondante. La tôle T est ordinairement portée au rouge; placée sur la forme A *(fig. 3)*, on fait agir le mandrin B, soit par son poids en le laissant tomber d'une certaine hauteur, ainsi qu'on le faisait autrefois pour le cintrage des demi-viroles de chaudières, soit, mieux, en développant entre les deux mandrins une pression suffisante à l'aide d'une presse.

Ce dernier procédé s'applique avantageusement lorsque le nombre de tôles à cintrer est considérable. C'est ainsi que pour les tubes du pont du Forth, constitués par des éléments rivés, on a employé des mandrins cintreurs *(fig. 4* et *5)* (1) recevant la pression de quatre puissantes presses hydrauliques.

Le mandrin inférieur A reposait sur les têtes des pistons et se déplaçait verticalement.

Le mandrin supérieur était fixé sur les colonnes de la presse par l'intermédiaire de la traverse supérieure D. Les mandrins étaient rechangeables à volonté suivant la courbure à donner. On conçoit que l'opération était plus rapide et plus certaine qu'avec une cintreuse à cylindres.

Cintrage des galbords.

La construction des navires en tôle donne lieu à la confection de pièces cintrées, à courbures variables, à surfaces gauches, qui prennent le nom de *galbords*. Il faut employer des machines spéciales telles que celle *(fig. 6* et *7)* (2) qui façonne des tôles à

(1) *Portefeuille des Machines*, mai 1890. Pl. XIX et XX.

(2) Brevet du 13 septembre 1887, M. Lagane.

partie restant plane, à parties affectant la forme d'une surface gauche quelconque ayant des génératrices rectilignes.

La machine comporte un bâti en fonte A dont le dessus forme une table horizontale A′ et dont les faces latérales sont verticales. Sur la face antérieure du bâti sont noyées des barres métalliques C articulées à leur partie supérieure en D, tandis que leur partie inférieure peut s'appuyer librement sur la barre F dont les extrémités sont soutenues par des goupilles G engagées dans l'un quelconque des trous percés dans les secteurs H fixés à chacun des bouts du bâti A.

La possibilité de mettre les broches dans des trous différents des secteurs extrêmes permet de donner à la barre d'appui F une position plus oblique par rapport à l'horizontale, et de former, par les barres C qui s'y appuient, une surface gauche se raccordant avec une surface plane suivant la ligne horizontale d'articulation des barres C qui jouent le rôle de génératrices d'un mandrin de forme. Cette surface plus ou moins gauche est précisément celle que doit avoir la tôle T placée sur la table A′ du bâti.

Au-dessus de la table, et dans toute sa longueur, se trouve un sommier B, supporté à ses extrémités par deux petites presses hydrauliques solidaires du bâti. Sous l'action de ces presses, le sommier B, guidé par les tiges N, peut monter ou descendre et maintenir énergiquement la tôle sur la table.

A chacune de ses extrémités, le bâti A présente une partie surélevée et de formes appropriées, destinée à recevoir, dans le haut, une presse hydraulique D, susceptible d'osciller sur le tourillon O, et, dans le bas, une deuxième presse E, susceptible également d'osciller sur un tourillon. Les presses D sont reliées par leurs pistons à un gros rouleau en fer forgé M, libre de tourner sur ses tourillons. A ce même rouleau sont reliées les presses E au moyen des bielles N et des leviers en équerre P, oscillant en Q.

De la disposition de ces presses et de leur liaison avec le

rouleau M, on voit que celui-ci est constamment tiré en arrière vers les barres C par les presses E, tandis que les presses D le font monter ou descendre sur ces barres. La combinaison de ces deux forces fait que le rouleau M s'applique constamment sur les barres C qui engendrent la surface gauche ou la forme à donner à la tôle.

Pour opérer, il convient de disposer la barre F de telle sorte que les barres extrêmes C qui s'y appuient forment chacune, avec le bord de la table, l'angle voulu. Toutes les barres intermédiaires prennent alors l'angle convenable en s'appuyant sur ladite barre.

La tôle, chauffée au rouge, est placée sur la table A' dans la position indiquée *(fig. 6)*, puis le chapeau ou sommier M est abaissé pour la maintenir. A l'aide de la boîte de manœuvre T, on fait actionner les presses D et F. Le rouleau se meut; il s'abaisse et décrit, en faisant fléchir la tôle, la forme déterminée.

La machine est parfois double *(fig. 7)* et peut façonner des tôles sous la forme symétrique que l'on rencontre dans des superstructures telles que celles *figures 8* et *9*.

Signalons encore les dispositions de la machine *(fig. 10)* (1) pour tôles de carènes.

Le rouleau de cintrage R repose sur la tête de deux pistons hydrauliques HH, par l'intermédiaire de joints sphériques, qui permettent de soulever une des extrémités du rouleau plus que l'autre, pour pouvoir donner aux plaques le gauchissage nécessaire.

Afin de cintrer à volonté les plaques de différentes épaisseurs, on modifie l'écartement du rouleau de manière à graduer l'effort suivant les épaisseurs. Le rouleau peut, à cet effet, décrire une courbe autour de l'arête de l'angle à former et l'effort exercé est constant pendant toute l'opération.

Cette machine peut cintrer à froid des tôles d'acier de $9^m,45$

(1) Constructeurs : Hugh Smith et Cie (*Génie civil*, du 26 septembre 1891).

de longueur maximum; elle présente une échancrure qui permet d'opérer sur les tôles plates dont les deux côtés doivent être cintrés et avec une largeur maximum de $1^{m},75$.

Pendant l'opération, les plaques sont maintenues par des coins manœuvrés à l'aide d'un cylindre hydraulique C disposé sur la gauche de la machine, qui est desservie par un moteur à vapeur, des pompes et un accumulateur. Une grue hydraulique sert à la manutention des pièces qui sont chauffées dans des fours à gaz.

Cintrage des tubes.

Les tubes se cintrent avec des rouleaux à gorge de dimension correspondante *(fig. 11)*. Ici encore, le tube doit, le plus souvent, être rempli de sable ou de résine. Cependant, si les gorges des rouleaux emboîtent bien le tube, et cela sur une certaine longueur, on peut se dispenser de les remplir en vue d'éviter leur aplatissement prononcé. Ce dernier inconvénient est aussi empêché par l'emploi d'un galet intermédiaire G maintenant le métal latéralement.

La *figure 13* se rapporte à une petite machine actionnée à bras, pour cintrage de tuyaux en zinc, cuivre, laiton, fer, etc. Elle comprend trois cylindres à gorges de dimensions variables. Le cylindre supérieur A fait la pression en actionnant le volant-manivelle.

Les cylindres inférieurs BB′ sont mis en mouvement par la manivelle *g*. Pour les gros tuyaux, les machines sont mues mécaniquement et comprennent des galets en porte-à-faux rechangeables.

Cintrage au mandrin (1).

Le cintrage régulier d'un tuyau est encore obtenu rapidement en introduisant dans le tube droit un mandrin dont l'extrémité présente la courbure à produire *(fig. 12)*. Le tube étant fixé, le

(1) Procédé adopté par Sharp.

mandrin est tiré par un chariot de banc à tirer. La partie courbe du mandrin donne la forme. Cette partie doit être relativement courte pour ne pas développer un grand frottement exigeant une grande traction sur le mandrin. Le passage d'un mandrin droit permet de redresser un tuyau courbe.

Roulage par traction sur mandrin.

Une bande de tôle mince ayant une extrémité partiellement cintrée sur un mandrin cylindrique et passant à travers un mandrin-filière *(fig. 14)* se cintre, sur le mandrin intérieur, en forme de tuyau ou de gouttière.

La régularité est bien assurée lorsque le métal est légèrement étiré et s'applique sur les deux mandrins en forçant un peu.

Dans ce procédé, il y a traction développant une flexion de cintrage et une compression d'étirage. L'opération se fait sur un banc à tirer.

Le cintrage en travers de la longueur de la pièce, si celle-ci est longue, s'obtient dans de bonnes conditions et rapidement, au moyen de rouleaux ou galets, dont l'un présente la forme convexe et l'autre la forme concave. Ces rouleaux étant animés d'un mouvement de rotation et faisant pression sur la pièce, ils entraînent cette dernière et lui donnent la forme en gouttière adoptée pour divers objets en tôle mince. La cintreuse, le plus souvent actionnée à bras, présente les dispositions *figure 15.*

Ces machines, étant munies de guides ou de rouleaux de diamètres convenables, peuvent, de plus, donner à la pièce la forme cylindrique ou annulaire.

Énergie de cintrage.

Le travail de cintrage peut s'estimer par analogie avec le travail de flexion d'une barre que l'on enroule autour d'un rouleau de diamètre d correspondant à la courbure à donner si le métal n'est pas élastique (plomb, fer à haute température).

Si le métal conserve une certaine élasticité, le cintrage devant se faire sur un rouleau de diamètre plus petit que celui à obtenir, le travail est dans ce cas plus élevé.

Considérons le cintrage d'une pièce droite AB *(fig. 373)*, sur un mandrin de diamètre *d*.

Le moment résistant des sections de la pièce étant supposé constant et le métal dépourvu d'élasticité après avoir pris la courbure du mandrin, la déformation sera produite par un moment de flexion constant égal au moment résistant. Ce moment fléchissant pourra être représenté par des produits tels que

Fig. 373

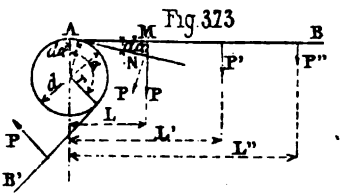
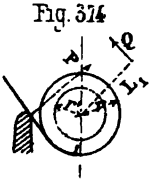


Fig. 374



$$M_f = PL = P'L' = P''L'' \ldots$$

On peut également admettre que le moment de flexion est dû à une force constante P s'appliquant à un bras de levier constant L.

Or, pour un déplacement élémentaire MN de l'effort P correspondant à un cintrage $rd\alpha$, le travail élémentaire sera, si on suppose la pièce restée droite dans la partie non cintrée :

$$dT = P \times MN = PLd\alpha = M_f d\alpha.$$

Pour un angle α, le travail sera

$$T_\alpha = \int_0^\alpha M_f d\alpha = M_f \alpha = \frac{EI}{\rho}\alpha = \frac{RI}{n}\alpha.$$

Pour une demi-virole on aurait $\alpha = \pi$

et

$$T_\pi = \pi M_f = \frac{\pi EI}{\rho} = \frac{\pi RI}{n}.$$

Le travail de cintrage est donc proportionnel à l'angle α et au moment de résistance.

Si $r\omega$ est la vitesse d'enroulement, le travail par seconde sera, si t est la durée correspondant à α,

$$T = \frac{M_f \alpha}{t} = Mf\omega = \frac{RI}{n}\omega = \frac{EI\omega}{\rho} = \frac{EI\omega}{r},$$

relation qui pourra être appliquée lorsque le rouleau tourne.

Il n'est pas douteux que le travail de cintrage varie avec la vitesse, les résistances devenant plus élevées. Cette variation est négligeable dans les limites pratiques. Quand le cintrage est obtenu par la rotation d'un rouleau disposé comme *figure 374*, il faut ajouter au travail de cintrage le travail du frottement de la pièce sur le support de buttée, et celui des tourillons du rouleau, si l'on veut déterminer le travail à développer par le moment de rotation QL_1. On aurait

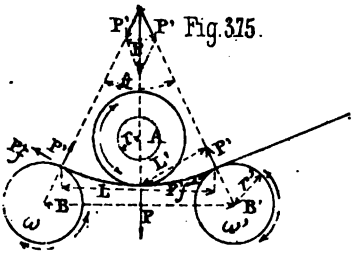


Fig. 375.

$$QL_1\alpha = M_f\alpha + Pfr\alpha + Pf'r'\alpha = (M_f + Pfr + Pf'r')\alpha.$$

f coefficient de frottement de la pièce sur le support, f' coefficient de frottement des tourillons. On néglige la réaction due à l'effort Q dont la direction est variable.

Le cintrage à la machine à trois rouleaux, se faisant par périodes continues, peut donner lieu à une estimation assez approximative de l'énergie nécessaire et à des relations d'équilibre que nous allons indiquer. Considérons d'abord le cas de cintrage avec un rouleau presseur A placé au milieu de la distance de deux rouleaux d'appui B *(fig. 375)*.

Les réactions P' sur les rouleaux B sont égales entre elles; on a la relation d'équilibre des forces extérieures

$$P' = \frac{P}{2\cos\frac{\theta}{2}}; \qquad P = 2P'\cos\frac{\theta}{2}.$$

La pression P donnera lieu à des réactions d'autant plus

petites que $\cos\frac{\theta}{2}$ sera plus grand, pour le cas de la tôle droite horizontale $P' = \frac{P}{2}$.

Les réactions P' seraient moindres avec une petite valeur de la distance L, qu'avec une plus grande; mais, nous allons voir que P devrait prendre une plus grande valeur si la distance L diminue.

Cette distance doit être assez réduite dans le cas de cintrage de viroles, afin d'obtenir une courbure suffisante des parties avoisinant les extrémités, dont l'élément extrême reste rectiligne et que l'on est obligé de courber au marteau ou au mandrin.

La valeur de la pression P, pour une même pièce, dépend de la courbure à donner à la pièce, des dimensions de cette dernière, de la distance L et du module d'élasticité du métal.

En considérant chaque tronçon de la pièce, à gauche ou à droite de l'axe, le moment fléchissant par rapport à la section du milieu est :

$$M_f = P'L' = \frac{PL'}{2\cos\frac{\theta}{2}};$$

or

$$L' = \frac{L}{2}\cos\frac{\theta}{2},$$

soit

$$M_f = \frac{PL\cos\frac{\theta}{2}}{4\cos\frac{\theta}{2}} = \frac{PL}{4}.$$

Le moment résistant de la section étant

$$\frac{RI}{n} = M_f = \frac{PL}{4},$$

il vient

$$P = \frac{4RI}{Ln},$$

qui montre que P sera d'autant plus grand que la distance L sera petite.

On a aussi

$$M_f = \frac{EI}{\rho} = \frac{PL}{4} \quad (\rho = \text{rayon de courbure}).$$

soit encore $$P = \frac{4EI}{\rho L},$$

relation montrant l'importance du rayon de courbure. Ces formules admettent que l'élasticité du métal n'est pas détruite, que la pièce reprend sa forme primitive si les effets n'agissent plus. Or, dans le cintrage, la courbure persiste, la limite d'élasticité est dépassée; de sorte que ces formules de flexion ne sont qu'approximatives. Néanmoins on pourra les appliquer avec suffisamment d'exactitude pour la pratique, si l'on a soin de donner aux variables R et E des valeurs déduites d'essais qui peuvent servir de base aux opérations semblables de cintrage.

Par exemple, pour cintrer une barre restangulaire de dimension a et b avec rayon de courbure ρ, il est nécessaire de développer un moment de flexion $M_{f_1} = P_1 L_1$;

on posera $$P_1 L_1 = \frac{RI}{n} = \frac{Ra^2 b}{6} = M_{f_1},$$

d'où l'on tire $$R = \frac{6 P_1 L_1}{a^2 b} = \frac{M_{f_1} n}{I}.$$

Pour le même rayon de courbure donné à une tôle de même épaisseur a et de longueur b' on déduira, en introduisant la valeur connue R,

$$M_f = \frac{Ra^2 b'}{6} = P'L',$$

d'où $$P' = \frac{Ra^2 b'}{6L'}.$$

Si pour de l'acier à froid et pour un rayon de courbure de 2,50, R a une valeur de 40^{kg} par millimètre carré,

$$a = 15^{mm}, \quad b' = 2^{m}, \quad L' = 400^{mm};$$

on aurait : $P' = \frac{40 \times \overline{15}^2 \times 2.000}{6 \times 400} = 7.500^{kg}$.

Si $\cos \frac{\theta}{2} = 0{,}90$, il vient

$$P = 2P' \cos \frac{\theta}{2} = 2 \times 7.500 \times 0{,}90 = 13.500^{kg}.$$

On déduit aussi

$$E = \frac{R_2}{n} = \frac{40 \times 2.500}{7{,}5} = 13.333.$$

Le travail de cintrage pendant un passage, soit le premier, en partant d'une pièce droite, pourra s'estimer en considérant la période de rotation des rouleaux. Remarquons que le rouleau de droite donne seul la courbure qui reste acquise au tronçon de gauche pour lequel il n'y a plus de mouvement relatif de la tôle dans le sens normal, ainsi qu'il est facile de le concevoir en supposant que les rouleaux tournent en sens contraire.

Ces rouleaux ne seront plus soumis qu'aux réactions élastiques, il n'y aura plus de changement de forme, partant plus de travail de cintrage.

Il faut aussi signaler que le cintrage est possible lorsque l'élasticité du métal est suffisante pour conserver aux réactions P' et P des valeurs telles, que le frottement sur les rouleaux entraîneurs B puisse assurer l'avancement de la pièce. Dans le cas contraire, il y a glissement des rouleaux sur la pièce; il faut la pousser ou la tirer, ou mettre du sable sur les rouleaux cannelés, ou réduire la courbure.

Cette action de l'élasticité s'explique bien en considérant, par exemple, une pièce de plomb, métal dont l'élasticité est, pour ainsi dire, nulle. La descente du rouleau presseur A fera fléchir la barre qui ne réagira pas et ne donnera que des réactions P' dues seulement à son poids et insuffisantes pour développer le frottement nécessaire au déplacement.

En admettant que les deux rouleaux B reçoivent l'action motrice sous forme d'un moment de rotation $2M_t$, il faut que

le travail des forces d'adhérence $2P'f$ dues aux réactions P' soit supérieur au travail de flexion, plus celui de frottement des tourillons du rouleau A.

Pour estimer le travail de flexion, considérons un déplacement ED de la pièce *(fig. 376)*, le point E étant venu en D, le point D étant alors en C. On peut admettre que la partie CD est circulaire et de rayon de courbure ρ.

Si la partie DE n'avait pas été courbée, le point D se trouverait en F sur le prolongement de ED. (On suppose que le rouleau B' n'a pas relevé la pièce; ou encore, si le rouleau B est enlevé, le point E vient en E'; puis ce rouleau relève la pièce en parcourant le chemin E'D = FC.)

Le déplacement relatif du point D dans le sens normal ou de flexion est donc FC. La somme de tous ces déplacements successifs, qui se produisent à mesure que la pièce avance, détermine la déformation totale. Remarquons que les déformations partielles ont lieu sur le tronçon CD avec l'effort de flexion P', le maximum de courbure correspondant au point C. La pièce conserve une courbure constante à partir de ce point, lorsque le cintrage a pris un développement supérieur au tronçon de gauche CM.

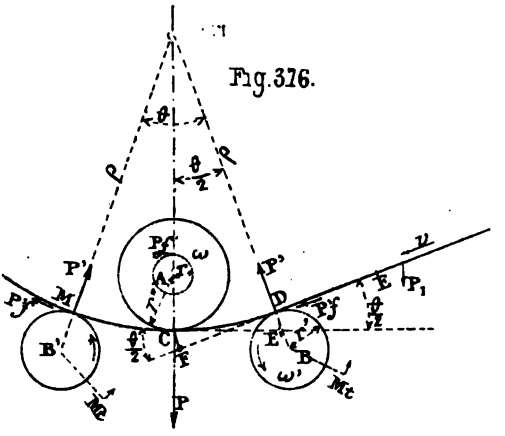


Fig.376.

Le travail de flexion correspondant à la partie ED = CD sera

$$T' = P' \times FC = P' \times CD\,\frac{\theta}{2} = M_f\,\frac{\theta}{2} = \frac{RI}{n}\,\frac{\theta}{2} = \frac{EI}{\rho}\,\frac{\theta}{2},$$

v étant la vitesse d'avancement de la pièce, et t la durée correspondant au passage de ED, ω' la vitesse angulaire du rouleau B, de rayon r', ω la vitesse angulaire du rouleau A dont les tourillons sont de rayon r, on a

$$v = \frac{CD}{t} = \omega' r', \qquad \text{soit} \qquad T' = P' v t \frac{\theta}{2} = P' \omega' r' \frac{\theta}{2}.$$

Le travail de flexion par seconde sera

$$T'_1 = P' v \frac{\theta}{2} = P' \omega' r' \frac{\theta}{2}.$$

Le travail de frottement sur les tourillons du rouleau A est égal à

$$P f' \omega r.$$

La relation du travail total sera donc

$$2P' f \omega' r' \leqslant P' \omega' r' \frac{\theta}{2} + P f \omega r.$$

En admettant que les rouleaux soient sur le point de glisser, on posera l'égalité

$$2P' f \omega' r' = P' \omega' r' \frac{\theta}{2} + P f' \omega r,$$

r'' est le rayon du rouleau A $\omega r' = \omega r''$. et il vient :

$$2P' f \omega r'' = P' \omega r'' \frac{\theta}{2} + 2P' \cos \frac{\theta}{2} f' \omega r.$$

La valeur minimum du frottement sur les rouleaux entraîneurs serait

$$2P' f = P' \frac{\theta}{2} + 2P' \cos \frac{\theta}{2} f' \frac{r}{r''}.$$

Le coefficient de frottement f ne devrait pas avoir une valeur inférieure à

$$f = \frac{\theta}{4} + \frac{\cos \frac{\theta}{2} f' r}{r''}.$$

Par exemple, soit

$$\frac{\theta}{4} = \frac{60^\circ \times 2 \times 3{,}14}{360 \times 4} = 0{,}26, \qquad f' = 0{,}1 \quad \frac{r}{r''} = 0{,}4$$

et $$\frac{\cos \frac{\theta}{2} f' r}{r''} = 0{,}86 \times 0{,}1 \times 0{,}4 = 0{,}034,$$

il vient

$$f = 0{,}26 + 0{,}034 = 0{,}294, \qquad \text{soit} \qquad f = 0{,}3.$$

Ces chiffres montrent bien l'importance du premier terme qui dérive de l'action de flexion. Il convient donc de ne pas trop écarter les rouleaux entraîneurs. Appliquons les formules du travail à l'exemple pour lequel on a cherché les valeurs de P et de P'; supposons $\omega' r' = 40^{mm}$;

1° Travail de flexion par seconde :

$$P'\omega' r' \frac{\theta}{2} = 7.500 \times 40^{mm} \times \frac{26° \times 2 \times 3{,}14}{360} = 132.000^{kgmm};$$

2° Travail de frottement des tourillons de A :

$$P' f' \omega r = P f' \frac{\omega' r' r}{r''} = 13.500 \times 0{,}1 \times 16^{mm} = 21.600^{kgmm}.$$

Total en kilogrammètres : $132 + 21{,}6 = 153^{kgm},6$.

L'adhérence sur les rouleaux B, avec un coefficient de frottement de $= 0.25$, pourrait produire ou correspondre à un travail

$$2P' f \omega' r' = 2 \times 7.508 \times 0{,}25 \times 40^{mm} = 150.000^{kgmm}$$

ou $$150^{kgm} < 153^{kgm},6.$$

L'entraînement n'aurait pas lieu; il faudrait augmenter le coefficient f d'adhérence. Avec les rouleaux cannelés employés pour les barres, le coefficient f prend des valeurs d'autant plus élevées que la pression est plus forte, et il peut atteindre 0,3 à 0,6 ou plus.

Le glissement de la pièce sur les rouleaux est à craindre lorsque la pièce est fortement cintrée, lourde, et qu'elle se trouve en fin de passage d'un seul côté des cylindres. Le poids P_1 du tronçon à gauche *(fig. 377)* donne lieu à des pressions verticales P_2 sur A; $P_1 + P_2$ sur B'. La force $(P_1 + P_2)$ produit une réaction normale P' qui augmente le frottement du rouleau B', mais la composante P'' tend au contraire à faire glisser la pièce sur le rouleau. De plus, le poids P agit pour diminuer la courbure; il a d'autant plus d'action que la distance entre les cylindres B' et A est plus petite.

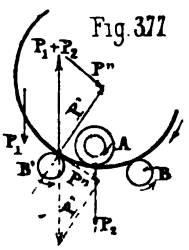


Fig. 377

Dans les formules de cintrage, nous avons dû négliger ces divers facteurs du travail, de même que les résistances au roulement qui sont, d'ailleurs, de faible importance.

Nous n'avons pas, non plus, recherché le frottement qui s'exerce sur les tourillons des cylindres B, ni indiqué la relation du travail des moments de rotation moteurs. Ces éléments rentrent dans l'étude d'établissement de la machine et non pas dans le travail proprement dit et direct des outils.

Cas de deux rouleaux serreurs et d'un rouleau pousseur.

Lorsque les deux rouleaux A et B *(fig. 378)* serrent la pièce, l'adhérence développée au contact doit pouvoir équilibrer :

1° La composante horizontale de la poussée P′ du rouleau C;

2° La résistance de roulement de la pièce sur le cylindre C;

3° Le frottement sur les tourillons du rouleau C.

L'adhérence de la pièce entre A et B est due à la force de serrage P et a pour valeur Pf sur chaque rouleau. Si les deux rouleaux sont entraîneurs, c'est-à-dire, sont commandés, l'adhérence motrice est 2Pf (f coefficient d'adhérence).

Dans le cas d'un seul rouleau commandé, l'adhérence motrice est Pf, et cette adhérence doit vaincre, en outre des forces désignées ci-dessus, le frottement des tourillons du rouleau A ou B non commandé.

La poussée P′ sera déduite de la relation du moment fléchissant

$$Mf = P'L' = \frac{EI}{\rho} = \frac{RI}{n},$$

soit

$$P' = \frac{EI}{\rho L'}.$$

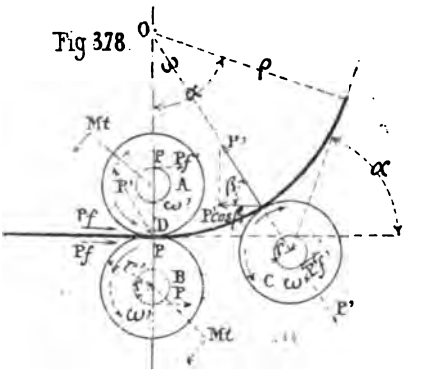
Pour une même pièce et une même courbure, la poussée P′ sera d'autant plus petite que L′ sera grand. Il y aurait donc avantage, au point de vue des efforts minima, à écarter le plus possible le rouleau C des deux autres. Mais, ici encore, il faut tenir compte des tronçons extrêmes qui présenteraient une courbure trop faible; ce qui conduit à rapprocher C de

A et B, de manière à pouvoir cintrer au plus près les parties extrêmes.

L'angle de la direction de P′ avec l'horizontale est variable avec les positions du rouleau C. Pour une valeur donnée B, la composante horizontale est égale à P′ cos B.

Elle est d'autant plus grande que le rouleau C se trouve plus près de A et B, et plus au-dessus de l'horizontale tangente avec A et B. Le maximum correspond donc au dernier passage, pour une même valeur de P′, ce qui conduit à donner davantage de serrage entre A et B.

Fig 378.



Remarquons que lorsque le mouvement a le sens des flèches pointillées, la composante P′ cos B agit dans un sens favorable au déplacement de la pièce.

La résistance au roulement de la pièce sur le rouleau C est négligeable.

Le frottement sur les tourillons du cylindre C est dû à la poussée P′ donnant lieu à une réaction égale et de sens contraire; on peut négliger la réaction due au poids du cylindre C.

f' étant le coefficient de frottement, et r le rayon des tourillons; le frottement sera $P'f'$ et le moment de ce frottement est $P'f'r$.

Le travail de cintrage correspondant à un angle α sera

$$T\alpha = M_f\alpha = \frac{EI\alpha}{\rho} = \frac{RI\alpha}{n}.$$

Si ce travail est continu et correspondant à une durée de t secondes, celui par unité de temps est

$T_c = M_f \frac{\alpha}{t} = M_f\omega$ (ω vitesse angulaire par rapport au centre O).

La relation du travail par seconde, en tenant compte des frottements des tourillons, sera, si ω' est la vitesse angulaire de A, B, C, égaux en diamètres, et r les rayons des tourillons :

$$T = M_f\omega + 2Pf'r\omega' + Pf'r\omega' = \frac{EI\omega}{\rho} + f'r\omega'(2P + P').$$

Si les deux rouleaux A et B sont commandés par un moment de rotation M_t, on a $T = 2M_t\omega$.

Si un seul rouleau est commandé, le moment de rotation M'_t donne $T = M'_t\omega$.

Les deux cylindres étant actionnés, et le glissement étant sur le point de se produire entre A et B sur la pièce, le rayon des cylindres étant r', le travail de l'adhérence doit être au moins égal à

$$2Pfr'\omega' = M_f\omega + P'f'r\omega'.$$

soit
$$Pf = \frac{M_f\omega}{2r'\omega'} + \frac{P'f'r\omega'}{2r'\omega} = \frac{EI\omega}{2\rho r'\omega'} + \frac{P'f'r}{2r'}.$$

Cette relation donne la plus petite valeur de serrage en posant

$$P = \frac{EI\omega}{2\rho r'\omega' f} + \frac{P'f'r}{2fr'}.$$

Appliquons ces formules au cas de cintrage d'une tôle d'acier dont les éléments sont :

Épaisseur $a = 20^{mm}$.

Largeur $b = 3.000^{mm}$ $\rho = 2.000^{mm}$ $r' = 200^{mm}$

$r = 50^{mm}$ $v = \omega\rho = \omega' r' = 40^{mm}$ $\omega = \frac{40}{2.000} = 0^{mm},02$

$\omega' = \frac{40}{200} = 0^{mm},2$ $f = 0,15$ $f' = 0,1$ $L' = 400$

$E = 10.000$ $I = \frac{ba^3}{12} = \frac{3.000 \times \overline{20}^3}{12} = 2.000.000$

$$M_f = \frac{EI}{\rho} = \frac{10.000 \times 2.000.000}{2.000} = 10.000.000^{kgmm}.$$

La poussée

$$P' = \frac{EI}{\rho L'} = \frac{10.000 \times 2.000.000}{2.000 \times 400} = 25.000^{kg}.$$

La pression de serrage

$$P = \frac{EI\omega}{2\rho r'\omega' f} + \frac{P'f'r}{2fr'} = \frac{10.000 \times 2.000.000 \times 0.02}{2 \times 2.000 \times 200 \times 0{,}2 \times 0{,}15}$$

$$+ \frac{25.000 \times 0{,}1 \times 50}{2 \times 0{,}15 \times 200} = 16.666{,}6 + 2.083{,}3 = 18.750^{kg}.$$

L'adhérence d'entraînement

$$Pf = 18.750 \times 0{,}15 = 2.865^{kg}.$$

Le travail de l'adhérence minimum

$$2Pfr'\omega' = 2 \times 2.865 \times 40 = 230^{kgm}.$$

Le travail de cintrage

$T_c = M_f\omega = 10.000.000 \times 0{,}02 = 200.000^{kgmm}$, soit 200^{kgm}.

Le travail de frottement des tourillons du pousseur est donc de 30^{kgm}.

Fig 379

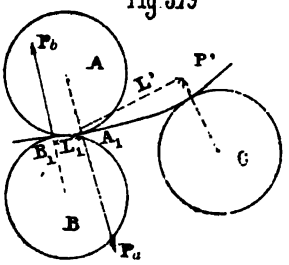
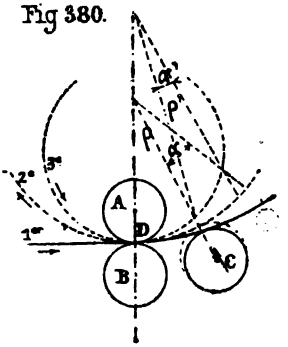


Fig 380.



La tension ou la compression du métal dans les fibres extérieures est donnée par la relation

$$R = \frac{En}{\rho} = \frac{10.000 \times 10}{2.000} = 50^{kg} \text{ par millimètre carré.}$$

On voit que l'énergie dépensée pour le cintrage est relativement peu élevée, mais que les tensions et compressions du métal sont très grandes.

Signalons que la poussée P' se reporte au point de contact D et doit être contre-balancée par les pressions de serrage. La poussée P' agissant par l'intermédiaire de la pièce formant

levier, tend à écarter les rouleaux A et B. Le levier prenant appuis sur des points A_1, B_1 *(fig. 379)*, très rapprochés, il peut se développer des réactions P_a P_b excessives.

Si L_1 est la distance entre les points A_1 et B_1, on a

$$P_b = \frac{P'L'}{L_1} \quad \text{et} \quad P_a = P_b + P' \text{ (sensiblement).}$$

Par exemple, si

$$L_1 = 40^{mm}, \qquad P' = 37.500^{kg}, \qquad L' = 400$$

il viendrait

$$P_b = \frac{37.500 \times 400}{40} = 375.000^{kg}.$$

Il convient de serrer les rouleaux A et B au plus près et de ne pas exagérer la poussée P', c'est-à-dire le cintrage. Il ne faut pas cependant non plus exagérer la pression entre A et B, ce qui donnerait de grands frottements sur les tourillons. C'est l'inconvénient de cette disposition des cylindres serreurs A et B.

Cintrage en plusieurs passages.

Le cintrage se faisant ordinairement en plusieurs passages successifs, il y a lieu, après le premier passage, de tenir compte de la courbure précédemment obtenue. Si ρ' est le rayon de courbure de la pièce avant le passage considéré, ρ celui obtenu durant le passage *(fig. 380)*, on pourra poser

$$\frac{M_f}{M'_f} = \frac{\dfrac{EI}{\rho}}{\dfrac{E'I}{\rho'}} = \frac{E\rho'}{E'\rho}.$$

Si on admet que $E = E'$, il vient

$$\frac{M_f}{M'_f} = \frac{\rho'}{\rho};$$

d'autre part, on a

$$T = M_f\alpha \qquad T' = M'_f\alpha'$$

(les angles α et α' correspondant à une même longueur développée), soit

$$\frac{T}{T'} = \frac{M_f \alpha}{M'_f \alpha'} = \frac{\rho' \alpha}{\rho \alpha'},$$

$$\frac{T + T'}{T'} = \frac{\rho' \alpha + \rho \alpha'}{\rho \alpha'}.$$

Le travail de cintrage proprement dit, pour passer d'une courbure primitive à une courbure finale, reste le même, quel que soit le nombre de passages; mais il n'en est pas de même des travaux des frottements; de plus, les réactions élastiques s'exercent à chaque passage avec une intensité à peu près constante; les pressions de serrage sont toujours supérieures à celles nécessaires, il s'ensuit que la proportion d'énergie dépensée est plus grande en opérant avec un grand nombre de passages qu'en opérant avec un petit nombre de passages (1).

La relation de la fatigue du métal $R = \frac{En}{\rho} = \frac{Ea}{2\rho} = \frac{Ea}{D}$ montre bien l'influence de l'épaisseur a et du rayon de courbure ρ ou du diamètre D de la virole. On ne saurait donner aux fortes épaisseurs une courbure trop prononcée sans déterminer des tensions R anormales, donnant lieu à des criques. Quand on opère à froid sur des tôles de fer ou d'acier, la tension dans les fibres extérieures atteint souvent de 25 à 30^{kg} par millimètre carré; aussi convient-il de cintrer à chaud si le métal est peu ductile, en ne perdant pas de vue que la température doit être supérieure à 300°, celle-ci correspondant à un point critique pour lequel le fer et l'acier sont très cassants. Pour le cuivre, à cause de la variation des températures des points critiques, il est préférable de cintrer à froid. Un recuit restituant au métal sa ductilité primitive, en partie détruite par le cintrage, sera toujours favorable s'il est bien

(1) Ces considérations théoriques sur les procédés de cintrage n'ayant, à notre connaissance, pas encore été exposées, nous avons été conduit à leur donner un certain développement.

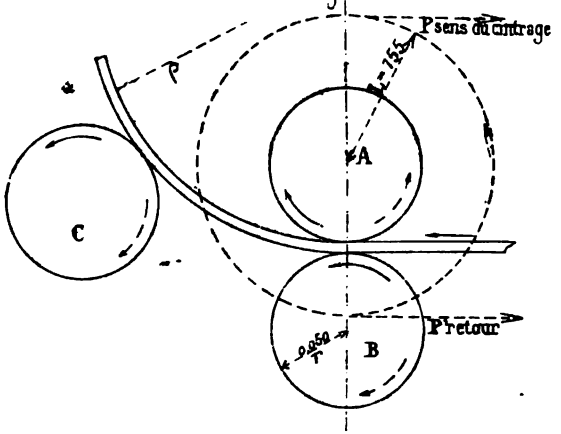
Essais de cintrage. Tableau n° 34.

NUMÉROS D'ORDRE	VALEURS de P	VALEURS de P'	VALEURS de P — P'	VALEURS d ρ	DIMENSIONS de la SECTION	VALEURS DU MODULE $\frac{n}{I}$	VALEURS de $\frac{\rho}{I}$	R CALCULÉE	E CALCULÉE	OBSERVATIONS
	kg							kg		
1	105	55	50	135	23 × 7	0,0053	0,20	112	4240	La vitesse variant dans de faibles limites, les efforts varient peu. Pour des vitesses de 0m20 par minute à 1m les différences en plus étaient de 1 à 10/0.
2	130	50	80	95	23 × 7	0,0053	0,15	129	3650	
3	110	50	60	420	40 × 11	0,0012	0,09	100	7509	
4	195	100	95	250	40 × 11	0,0012	0,06	90	4480	
5	190	65	125	200	40 × 11	0,0012	0,045	91	3487	
6	85	50	35	200	23 × 7	0,0053	0,30	112	6378	

conduit. Pour les viroles de grand diamètre, le recuit se fait dans des étuves capables de porter uniformément les pièces au rouge.

Pour calculer exactement la réaction du métal dans les fibres extérieures allongées de i par unité de développement, il faut connaître le coefficient E d'allongement et la tension R qui y correspondent. Ces facteurs peuvent être estimés en faisant un essai de traction directe qui permet d'établir la loi des efforts rapportés à la section sous charge et la loi des allongements.

Fig. 381



Par exemple, une virole de 2^m de diamètre a une épaisseur $a = 20^{mm}$; l'allongement proportionnel des fibres extérieures est

$$i = \frac{a}{D} = \frac{20}{2.000} = 0{,}01.$$

A un tel allongement, du fer fondu, très ductile, accuse une tension de 22^{kg} par millimètre carré et un coefficient d'allongement 2.200, nombres qui satisfont l'égalité :

$$R = Ei = 2.200 \times 0{,}01 = 22^{kg}.$$

Avec un métal moins ductile, on a un coefficient d'allongement plus élevé (soit E = 4.000); la tension R subie au cintrage serait

$$R = Ei = 4.000 \times 0{,}01 = 40^{kg}.$$

La déformation étant permanente, la tension de cintrage ne persiste pas, le métal des fibres extérieures se trouve dans un état de tension voisin de sa limite d'élasticité si le rapprochement des pinces ou bords assemblés se fait avec effort.

Ainsi donc, les métaux à coefficient E d'allongement élastique ou permanent très élevé sont ceux qui fatiguent le plus au cintrage à froid et la tension du métal peut être très grande.

Essais de cintrage.

La machine d'essai comprenait deux rouleaux presseurs AB *(fig. 381)* et un troisième rouleau C produisant la flexion. Le rouleau A portait sur son axe une poulie enroulée d'une corde reliée à une tête de moufle par l'intermédiaire d'un dynamomètre.

Nous présentions la barre, nous mettions en marche à vitesse lente et la lecture de la traction P était notée dans la période moyenne du cintrage.

Puis, faisant tourner le rouleau A en sens inverse, la barre de fer était ramenée en avant, et l'effort P′ observé au dynamomètre mesurait la valeur des frottements divers dus aux pressions de serrage des rouleaux, à l'élasticité restante de la pièce, etc.

La différence P − P′ est donc l'effort précisément nécessaire pour produire le cintrage donné.

Parmi les essais que nous avons faits, nous en consignons quelques-uns dans le tableau n° 34, qui fait ressortir les valeurs des coefficients de résistance de cintrage et d'élasticité relative E, déduites en appliquant la formule du travail pour un tour de la poulie du rayon L = 135^{mm} :

$$T = 2\pi L(P - P') = \frac{RI}{n}\alpha = \frac{EI}{\rho}\alpha,$$

expressions dans lesquelles tout est connu, sauf R et E. α est

l'angle au centre qui correspond dans le cercle de rayon de courbure ρ de la pièce, à l'arc $2\pi r$ développé par un tour du rouleau A, de rayon $r = 50^{mm}$.

On peut donc poser $2\pi r = \rho\alpha$ soit $\alpha = \dfrac{2\pi r}{\rho}$

que l'on porte dans la relation du travail

$$T = 2\pi L(P - P') = \frac{2\pi r R I}{\rho n} = \frac{E I 2\pi r}{\rho^2},$$

soit $$R = \frac{L(P - P')\rho n}{r I} \qquad E = \frac{L(P - P')\rho^2}{I r}.$$

Il ne faut pas perdre de vue que les valeurs de R et de E sont très relatives ou fictives, qu'elles permettent seulement de déduire l'énergie dépensée ou les efforts moteurs.

Ainsi, dans l'essai n° 5, l'allongement proportionnel des fibres extérieures est égal à $i = \dfrac{11}{400} = 0{,}0275$, ce qui correspond dans un essai de traction directe avec le fer de la même barre, à une traction de 32,5 et à un coefficient d'allongement E = 1.180, tandis que les valeurs du tableau sont R = 91, E = 3.487, soit environ trois fois plus.

A titre d'exemple, cherchons l'énergie dépensée pour enviroler une tôle de 1^m de largeur au diamètre $= 2 \times 0{,}420 = 0{,}840$, l'épaisseur étant 11^{mm}.

Le tableau indique, essai n° 3, qu'il faut un effort $P = 110^{kg}$ pour une largeur de 0,040; il faudra un effort de

$$110 \times \frac{1{,}00}{0{,}040} = 2.750^{kg}.$$

Le travail pour un tour de rouleau serait $T = 2.750 \times 2\pi L$, ce qui correspond à une longueur de cintrage de $2\pi r$. La virole ayant un développement égal à πD, le travail serait

$$2.750 \times 2\pi L \times \frac{\pi D}{2\pi r} = 2\pi L \times 2.750 \times \frac{D}{22}$$

$$= 2 \times 3{,}14 \times 0{,}155 \times 2.750 \times \frac{0{,}840}{0{,}100} = 22.470^{kgm}.$$

Si le cintrage se fait à la vitesse de $0^m,01$ par seconde, le travail par seconde serait $\frac{22.470}{84 \times 3,14} = 85^{kgm}$, soit un peu plus d'un cheval-vapeur.

On voit que l'énergie dépensée pour le cintrage d'une telle virole n'est pas élevée.

Cintrages partiels cumulés.

Nous avons aussi opéré en cintrant en plusieurs passages afin de faire ressortir les différences au point de vue du rendement, en comparant avec le cintrage en une fois.

Ainsi, une barre de section $= 23 \times 7$ a exigé :

Première passe : un effort $P - P' = 80 - 55 = 25^{kg}$
Deuxième passe : — $P - P' = 70 - 55 = 15^{kg}$
TOTAL. . . . 40^{kg}

La même courbure obtenue en un seul passage a donné

$$P - P' = 78 - 50 = 28^{kg},$$

soit environ un quart en moins.

Dans un deuxième essai de courbure plus prononcée, on a trouvé :

En trois passages $28 + 20 + 30 = 78^{kg}$
En deux — $35 + 30 = 65^{kg}$
En un — 50^{kg}.

Avec un échantillon de section $= 40 \times 11$, les résultats ont donné :

En trois passages $60 + 50 + 50 = 160^{kg}$
En deux — $50 + 60 = 110^{kg}$
En un — 95^{kg}.

Si on tient compte des efforts P', on voit que le cintrage en plusieurs passages exige deux, trois, cinq fois, ou plus encore, d'énergie qu'en un seul passage.

Signalons encore l'essai suivant : une barre de fer de section $a \times b$ a été cintrée par une machine ordinaire à manivelle à

main dont t tours de manivelle correspondent à une longeur l de développement de la barre. L'effort sur la manivelle étant P, le rayon de manivelle r, le rayon de courbure de la barre ρ. La relation du travail devient

$$T = 2\pi rtP = M_f\alpha = \frac{RI}{n}\alpha = \frac{EI\alpha}{\rho},$$

et comme

$$\alpha = \frac{l}{\rho},$$

on tire

$$R = \frac{12\pi rtP\rho}{ab^2l}.$$

Dans un essai, on a

$r = 320$, $t = 10$, $P = 2^{kg},6$, $\rho = 980$, $a = 65$, $b = 25$, $l = 95^{mm}$.

soit

$$R = \frac{12 \times 3,14 \times 3,20 \times 10 \times 2,6 \times 980}{65 \times 25 \times 25 \times 95} = 79^{kg}.$$

L'allongement proportionnel des fibres extérieures s'élevait à

$$i = \frac{14}{1,000} = 0,014,$$

ce qui correspond, pour le fer employé, à une traction réelle voisine de 22^{kg} plus petite que la traction fictive 79^{kg}.

La valeur fictive du coefficient E serait

$$E = \frac{R\rho}{n} = \frac{79 \times 980}{12,5} = 6.200.$$

La valeur réelle dans les fibres extérieures serait

$$E = \frac{R}{i} = \frac{22}{0,014} = 1.570 < 6.200.$$

Dans cet essai, l'effort sur la manivelle, compris frottements, cintrage et effet de l'élasticité, s'élevait à $4^{kg},150$. Au retour, l'effort étant de $1^{kg},550$, on déduit l'effort relatif au cintrage

$$4,150 - 1^{kg},550 = 2^{kg},6.$$

Pour le cintrage d'un tuyau de cuivre rempli de résine, dont le diamètre extérieur était 83^{mm}, le diamètre intérieur 80^{mm}, en opérant avec une machine à trois rouleaux à gorge, présentant

un module ou rapport de la vitesse de l'effort moteur P à la vitesse de déplacement du tuyau égal à 50, nous avons noté les nombres suivants des valeurs de P correspondant à divers rayons de courbure obtenus successivement :

Rayons de courbure ρ.	$3^m,05$	$2^m,48$	$1^m,82$	$1^m,25$	$1^m,06$
Effort moteur P. . . .	20^{kg}	18^{kg}	20^{kg}	20^{kg}	28^{kg}.

L'effort de retour ou tare s'est maintenu à une valeur sensiblement constante égale à 8^{kg}.

L'énergie de cintrage dépensée par passage, pour cintrer 1^m de tuyau, s'élevait, en prenant pour P la valeur 20^{kg}, à

$$20 \times 50 \times 1 = 1.000^{kgm}.$$

Et comme précisément cette valeur correspond dans la machine à la longueur développée par minute, le travail par seconde en chevaux-vapeur était

$$N = \frac{1.000}{60 \times 75} = 0^{ch},22.$$

Dressage ou planage.

Souvent les pièces droites présentent des irrégularités de profil, une courbure de fabrication ou une déformation partielle qu'il faut faire disparaître pour obtenir la forme rectiligne voulue par l'opération dite : dressage ou redressage. Cette opération étant un cas particulier du ployage, s'exécute par les mêmes procédés : soit au maillet à froid pour les minces épaisseurs, à chaud pour les fortes épaisseurs ; soit au marteau sur l'enclume, sur tables ou tas à dresser *(fig. 1 à 5, pl. LXII)*, qui, pour le cas de fers profilés, présentent des formes appropriées, des rainures pour loger les ailes. Si les pièces sont longues, on a soin de les placer sur des galets de roulement *(fig. 6, 7, 8)*, le dressage ou dégauchissage transversal et longitudinal se faisant au marteau en frappant entre les points d'appui sur les parties fléchies pour les contre-fléchir de manière à obtenir finalement la régularité voulue.

C'est avec ces moyens que l'on dresse ordinairement les fers, plates-bandes pour poutres de charpentes ou autres, les tôles de dimensions moyennes. Il faut des ouvriers spécialisés pour opérer rapidement et sûrement.

On peut également utiliser, pour les barres, les diverses presses à levier, à vis, signalées précédemment. Pour les métaux élastiques, on est conduit à donner une contre-courbure un peu plus grande que celle que présente la pièce, pour tenir compte de l'élasticité du métal.

Quand il s'agit de longues barres sortant des laminoirs à haute température, le dressage se fait immédiatement, par exemple, au moyen d'une presse *(fig. 9)* (1) comprenant une table Z à rebord R, contre lequel les barres à dresser sont pressées au moyen de sabots en fonte K mus par des vis V actionnées par des engrenages coniques, la commande se faisant, à volonté, dans les deux sens, à vitesse rapide pour l'éloignement des sabots, à vitesse lente pour le rapprochement produisant la pression. Cette commande est faite par un moteur direct à vapeur.

Lorsqu'on veut dresser une barre, les sabots K tirés par les vis V viennent buter contre la partie U *(fig. 10* et *11)* de la table, qui présente une forme arrondie, et, rencontrant cet obstacle, ils font un quart de tour sur leur axe T. Ce mouvement a pour effet de faire entrer la partie supérieure du sabot dans deux rainures ménagées dans la table et destinées à guider le sabot, tandis que la partie supérieure fait saillie sur la table et vient presser la pièce contre le rebord R.

Les sabots étant reculés à bout de course, basculent par leur poids propre et laissent la table libre.

En rapportant des touches contre le rebord, cette machine peut être utilisée pour courber les barres. Quand on opère à chaud sur des barres profilées à section dissymétrique, il

(1) Brevet Ziane, 17 mars 1877.

faut tenir grand compte de la répartition des effets de contraction, en donnant au dressage une contre-courbure qui disparaît par le refroidissement.

Le dressage par flexion s'applique également aux tôles en employant une simple machine à cintrer; on cintre d'abord légèrement la tôle, puis en la faisant repasser après l'avoir retournée (1).

Parfois, ce procédé ne suffit pas, la régularité n'est pas complète; il faut faire usage de machines spéciales à rouleaux multiples *(fig. 12)*.

La tôle subit plusieurs flexions; un premier passage détermine, dans des tôles minces, des ondulations se terminant par un cintrage de sortie.

En revenant en arrière la tôle reprend une forme plane, les rouleaux étant convenablement réglés. L'opération se fait en deux ou plusieurs passages, d'autant plus nombreux que la tôle est plus mince et plus irrégulière.

Pour les fortes épaisseurs (par exemple les tôles de 30^{mm} pour longerons de locomotives), la courbure donnée pour briser les défectuosités est insensible.

Les machines à dresser ou à planer sont à sept rouleaux pour les épaisseurs jusqu'à 8^{mm}; elles sont à cinq rouleaux pour les épaisseurs au-dessus.

Ces machines présentent les dispositions de la *figure 13* à commande par courroie (2), ou celles de la *figure 14* à commande directe par moteur adapté à changement de marche (3).

Cette dernière comprend des cylindres de 310^{mm} de diamètre sur 2^{m} de longueur. Les cylindres supérieurs se déplacent

(1) Le dressage ou redressage des tôles avec des cylindres a été appliqué en Angleterre à la fin du XVIIe siècle dans la fabrication des tôles de fer-blanc que l'on courbait et recourbait pour enlever l'oxyde, puis que, finalement, on dressait. Ce procédé était appliqué dans quelques forges. Il était imité du procédé appliqué au dressage des fils.

(2) *Engineering*, 1885. Constructeurs Rushworth and C^{o}, à Sowerby Bridge.

(3) *Engineering*, 1891.

verticalement au moyen de vis actionnées simultanément de façon à conserver le parallélisme. Cependant, les deux cylindres extrêmes peuvent être élevés ou abaissés séparément, par commande indépendante, au moyen des vis sans fin actionnant les roues formant écrous des vis verticales.

Cette machine, construite pour les ateliers de chemins de fer, pèse 19^{T}.

La machine pour tôles minces est d'un emploi très avantageux, les rouleaux de divers modèles ont des diamètres variables de 70 à 200^{mm}.

Redressage des fils de métal.

Le redressage des fils roulés en botte s'obtient par flexions successives et tractions combinées, en les faisant glisser entre des chevilles convenablement disposées *(fig. 15)*.

Ce procédé, très anciennement employé, a donné lieu à une description dans l'*Encyclopédie*, qui a un certain intérêt à être reproduite textuellement (1) : « Cette fonction paraît bien simple; et, si cependant elle est la plus difficile à pratiquer de toutes les autres, tout l'art consiste à placer six clous sur une planche d'environ huit pouces de long sur six de large *(fig. 15, 16* et *17)*, que l'on nomme engin, de telle sorte que l'espace du vide entre les trois premiers soit exactement de l'épaisseur de chaque sorte de fil que l'on dresse en ligne droite, et que les autres clous puissent faire prendre au fil une certaine ligne courbe qui doit changer suivant les différentes grosseurs et premières courbures de ce fil, et dont la construction seule donnerait bien de l'ouvrage aux théoriciens.

» L'intervalle de ces clous doit aussi être différent pour chaque grosseur du fil, et la *figure 15* représente la grandeur au naturel et la portion de ces six clous, telle qu'elle doit être pour dresser le fil propre à faire les épingles n° 10, dont l'espace est de deux pouces quatre lignes; celle pour les épingles n° 6 est de quatre

(1) *Encyclopédie*. Album des planches, tome IV.

pouces, et ainsi à proportion des autres grosseurs, en augmentant d'une ligne au-dessus du n° 10 et en diminuant d'autant en dessous.

» Les dresseurs mêmes, ouvriers qui sont journellement dans l'usage de poser ces clous, manquent souvent de le faire dans les proportions convenables, et pour lors le fil n'est pas parfaitement droit, ou est si courbe qu'ils sont obligés de recommencer l'opération; mais, comme ces différents ouvriers travaillent tous à leur tâche, le fabricant n'y perd rien.

» L'on voit qu'il faut un engin différent pour chaque sorte de fil, à l'exception, néanmoins, que lorsque ce fil est un peu mou, un même engin peut servir à deux grosseurs peu différentes l'une de l'autre. »

Le dressage des fils se fait actuellement en utilisant des galets à la place de pointes.

La *figure 18* montre la disposition d'un fil entraîné par une pince actionnée à la main. Les galets sont déplaçables à volonté sur leur support, afin de régler leurs positions relatives par rapport au diamètre du fil.

Dans la *figure 19*, le fil est entraîné par deux rouleaux à cannelures qui le pincent.

Enroulage.

L'enroulage est un cintrage de grande amplitude qui correspond à des enroulements multiples de la pièce autour d'un axe, de manière à obtenir une forme en spirale, ou en hélice, ou en spirale-hélice.

Ces formes sont adoptées pour la confection de paquets à souder pour bandages; elles s'appliquent aussi à certains tuyaux, aux ressorts, etc.

Les pièces de faibles dimensions transversales s'enroulent aisément à la main sur mandrin *(fig. 20)*, de diamètre un peu plus petit pour tenir compte de l'élasticité. A cause de l'élasticité, l'effort d'enroulement augmente avec le nombre de spires.

Si l'enroulement est de courbure variable déterminée, le mandrin affecte la forme voulue et sert de moule *(fig. 21)*.

Les grosses pièces, les gros tuyaux se contournent sur une table à chevilles multiples *(fig. 22)*.

Le mandrin est, dans certains cas *(fig. 23)*, animé d'un mouvement de rotation, la pièce s'enroule tout en étant soumise à une traction suffisante pour vaincre la résistance de flexion, ou pour obtenir un serrage plus ou moins énergique des spires entre elles; par exemple, quand il s'agit de ressorts.

L'enroulage hélicoïdal se fait aussi sur mandrins appropriés en inclinant à volonté les spires qui se rejoignent, se recouvrent en partie ou sont écartées régulièrement ou non *(fig. 24, 25* et *26)*.

L'opération se fait rapidement en faisant tourner le mandrin qui peut présenter des rainures hélicoïdales correspondant à la forme à obtenir *(fig. 27, 28* et *29)*.

Les *figures 30* et *31* se rapportent à un ancien rouet pour l'enroulement de fil de laiton sur mandrin rotatif adapté à l'arbre A. L'ouvrier dirige le fil au moyen d'un guide G, tout en actionnant le rouet (1).

Le mandrin peut rester fixe et la pièce tourner comme l'indique la *figure 32* (2), qui se rapporte à l'enroulement d'un fil sur une tige cylindrique I. Le fil enroulé est modérément serré dans une mâchoire-écrou en deux parties, réglée par la vis E. La machoire est solidaire d'un arbre creux A commandé par une poulie à frein recevant un câble de transmission. La partie enroulée, tournant, force le fil à s'enrouler sur le mandrin I.

Parfois, la pièce est enroulée en hélice et en spirale *(fig. 33, 34* et *35)*, formes adoptées pour ressorts divers, pour tuyaux flexibles ou serpentins, pour différentes autres pièces.

On emploie des machines spéciales qui comportent des galets cintreurs et dirigeurs obliquant l'enroulement à volonté, comme le montrent les *figures 36* et *37*.

(1) Dessin extrait de l'*Encyclopédie*.
(2) *Engineering*, janvier 1881.

Pliage. Bordage.

Le pliage est un coudage très prononcé dans lequel souvent les parties se rejoignent face sur face *(fig. 1, pl. LXIII)*. On désigne aussi par pliage ou bordage la formation de coudes plus ou moins aigus sur les bords des tôles *(fig. 2)*. Quelquefois le pli est multiple comme dans certains assemblages dits à agrafes *(fig. 3)*.

L'opération se fait au marteau et à l'enclume pour les pièces courantes, de la même façon qu'un coudage. Elle peut être achevée à l'étau *(fig. 4)* ou avec une autre presse analogue.

Les tôles minces sont maintenues dans des presses et on opère au maillet *(fig. 5)*. Avec des mandrins additionnels, on obtient facilement des bords rabattus sur angle voulu.

Les tôles de forte épaisseur se bordent à chaud par chauffage partiel ou total suivant les dimensions, sur mandrin de forme *(fig. 6)*, en frappant au maillet ou au marteau à devant, puis en régularisant à la chasse à mesure de l'avancement du travail. C'est ainsi que se font encore couramment les rebords des plaques de foyer, des plaques tubulaires, ceux des viroles, des gros tubes, des pièces de sujétion, des dômes, des cuissards, etc. *(fig. 7)*.

Il faut opérer progressivement de manière que le métal se refoule ou s'allonge sans former des plis prononcés ou des déchirures.

De plus, si le bord est tombé à chaud au rouge cerise et se rapporte à une pièce circulaire telle qu'une plaque tubulaire, il faut avoir soin, pour obtenir après refroidissement un rebord d'équerre, de lui donner un angle aigu d'environ 85°; la contraction due à la chute de température le ramène à 90°.

Lorsque le bord d'une pièce cylindrique est rabattu à l'extérieur *(fig. 8)*, le métal est d'autant plus allongé que le diamètre considéré du rebord est plus grand. L'allongement maximum a lieu sur le pourtour, dont la circonférence primitive $2\pi r$ est

devenue $2\pi(r + h)$, soit un allongement total égal à $2\pi h$ et un allongement proportionnel égal à

$$\frac{2\pi h}{2\pi r} = \frac{h}{r} = \frac{e'}{e},$$

e épaisseur primitive, e' épaisseur finale (sur le pourtour).

Il en est de même lorsque *(fig. 9)* le rebord cylindrique est ménagé dans une ouverture de tôle plane.

Le rebord correspondant à un faisceau circulaire *(fig. 10)* donne lieu à un refoulement du métal dont le maximum se produit sur le pourtour également et dans le rapport de raccourcissement proportionnel

$$\frac{2\pi h}{2\pi(r + h)} = \frac{h}{r + h}.$$

La surépaisseur du rebord est favorable à la solidité.

Retreignage.

Dans le cas de réduction de diamètre primitif, le bordage se fait par flexions progressives sur tout le pourtour du rebord qui présente, dans la déformation intermédiaire, des ondulations *(fig. 12)* qu'il convient de répartir uniformément. Puis, à mesure que le métal se refoule, les bosses disparaissent, ce qui constitue l'opération dite du retreint ou retreignage.

Il faut un métal très malléable, se retreignant bien sous le coup de maillet ou de marteau.

Si la plaque métallique était à chaque coup comprimée entre le tas et le marteau, il en résulterait un amincissement de la partie martelée comprise entre les outils, la surface de la pièce s'étendrait au lieu de se retreindre; il y aurait allongement. Pour obtenir une surface moindre, il faut augmenter l'épaisseur, refouler le métal, ce à quoi l'on parvient en donnant le coup de marteau à une faible distance du point de contact avec le support, en frappant en porte-à-faux, et en employant une panne convexe qui concentre la zone d'activité de la percussion et permet

d'augmenter l'épaisseur à mesure que le diamètre extérieur diminue.

Le tour de main spécial ne saurait d'ailleurs s'acquérir que par une pratique assez prolongée sachant utiliser les moyens les mieux appropriés à la forme de la pièce.

Le retreignage a de multiples applications dans le travail du cuivre à chaud ou à froid; dans ce dernier cas, il convient de recuire le métal à plusieurs reprises. On fait usage de divers types de tas dits bordoirs, tenus à la main ou fixés sur établi *(fig. 12)*. Le bordage, en grande partie fait au maillet, est achevé avec des marteaux de formes appropriées *(fig. 11)*, dits à retreindre s'ils font rentrer le métal des dernières inégalités de la pièce, dits à border ou à planer, suivant qu'ils rabattent le rebord ou le planent à la fin de l'opération.

Les petits martinets mécaniques convenablement disposés conviennent bien pour ce genre de travaux.

Sertissage.

Quand le pliage correspond à l'assemblage de deux ou plusieurs pièces par agrafement *(fig. 13)*, on assure le contact des parties en les martelant ou en les appliquant fortement par pression les unes contre les autres, ce qui constitue l'opération dite de sertissage, analogue à celle signalée aux procédés de mandrinage. La machine *(fig. 14)* montre l'application à l'aplatissement d'un joint de tuyau agrafé, serti par un galet se déplaçant et faisant pression.

Les bordages réguliers se font aussi mécaniquement avec des machines dites à plier ou à border. On peut distinguer celles pliant les bords droits d'un seul coup, la tôle étant maintenue par une presse et le bord relevé ou tombé par une traverse.

La *figure 15* est une plieuse verticale pour tôles minces. Suivant l'angle de rotation de la mâchoire B *(fig. 16)* par rapport à la barre A, on obtient l'angle de pliage voulu.

Les *figures 17* et *17 bis* se rapportent à une plieuse horizon-

tale analogue dont le déplacement de la barre plieuse est obtenu par une disposition avec excentrique.

Un autre mode d'action de l'outil caractérisant un procédé spécial de bordage est l'emploi de disques ou molettes tournant en sens contraire et dont le profil correspond à l'angle de pliage comme le montrent les *figures 18* et *19*.

La pièce est présentée à la main avec guides pour déplacement longitudinal ou de rotation s'il s'agit d'un flan circulaire.

Les *figures 20* et *21* se rapportent à une petite machine bordant les minces épaisseurs. (Nous indiquerons dans la deuxième partie d'autres machines plus puissantes pour les bordages des fortes épaisseurs, des récipients sous pression.)

Si la pièce est cylindrique et le bord rectangulaire ou arrondi, les molettes opèrent progressivement ainsi que l'indiquent les *figures 22*, *23* et *24*.

Pour les pièces coniques, les arbres des molettes *(fig. 25, 26* et *27)* sont inclinés.

Le sertissage s'exécute également avec des molettes de forme *(fig. 28 à 31)* et la machine *(fig. 32)* est disposée de manière à pouvoir présenter les pièces, dont l'une doit emboîter la douille support de l'arbre de la molette inférieure.

Ces procédés de bordage et de sertissage devraient être appliqués à quantité de travaux de chaudronnerie de cuivre que l'on exécute encore à la main par martelage.

Lorsqu'il s'agit de sertir un fond avec une virole, l'opération se fait progressivement avec deux ou trois galets dont l'un étagé, comme le montrent les *figures 1* à *6*, *planche LXIV*.

Ou encore la machine est disposée comme *figures 7*, *8* et *9*.

La virole ayant son rebord formé est présentée à son fond disposé sur une tablette. Les parties à sertir étant saisies par les galets coniques CB, et la pièce étant maintenue par les cônes galets, la rotation de la machine produit celle de la pièce entre les cônes C et B qui, se rapprochant, pressent les bords et le sertissent. Ces dispositions pour faibles épaisseurs sont

aussi adoptées pour fortes épaisseurs avec engins plus puissants.

Pour border extérieurement ou intérieurement des rebords en moyenne épaisseur, la machine est actionnée mécaniquement et peut présenter les dispositions *(fig. 10)*.

L'arbre A portant un galet supérieur est déplaçable verticalement en faisant agir la vis C sur ses coussinets guidés dans la tête du bâti B.

L'arbre portant le galet inférieur M est déplaçable longitudinalement.

La machine est d'abord actionnée par la manivelle K pour juger de la position relative de la pièce et des outils, puis mécaniquement par la courroie et les engrenages intermédiaires.

La manivelle G sert à régler la position des galets N par rapport à la plaque à border P.

Le support G tient le disque P entre deux pointeaux. La tige V sert d'appui et de guide au disque P. Le levier H à contrepoids L équilibre les supports de plaque. On borde progressivement en déplaçant les galets de bordage MM' (1).

Le bordage des grosses tôles se fait à la presse hydraulique sur des mandrins à bords arrondis.

La presse *(fig. 13)* (2) comprend un piston vertical armé d'une tête venant serrer la tôle sur le mandrin, puis, immédiatement, la tête d'un deuxième piston oblique plie le bord, le rabat contre le mandrin. La tôle est ensuite déplacée pour opérer à côté, si le métal est encore suffisamment chaud.

Remarquons que la tête du piston oblique est guidée par une glissière qui, de plus, la maintient, l'empêche de fléchir sous la réaction de la poussée.

Tweddell adopte trois pistons *(fig. 14)*: celui C maintient la tôle au-dessus du mandrin; celui E, horizontal, maintient la

(1) Nous signalerons une machine analogue, dans la deuxième partie, pour le bordage des plaques tubulaires.

(2) Constructeur, Hugh Smith et Cie, Glascow.

partie du rebord déjà formé, pendant que le troisième piston D, portant la tête de forme voulue, rabat le bord de la tôle.

Il convient de ne pas trop réduire le congé de raccord et d'opérer avec précaution, afin d'éviter les déchirures qui ont une plus grande tendance à se produire avec ces machines qu'en opérant au marteau à la main. C'est à la presse hydraulique que M. Fox borde les longerons de locomotive ou de wagons *(fig. 15* et *16)* en opérant à chaud sous une pression d'environ 60^{kg} par centimètre carré. Il faut un métal très ductile tel que l'acier doux, le fer fondu et un chauffage régulier pour assurer la parfaite exécution.

Les châssis de wagon bordés se construisent sur grande échelle à la Leeds Forge Company ; ils ont l'avantage de réduire le nombre des pièces d'assemblage telles que cornières, goussets et attaches diverses, dont le poids s'abaisse d'environ 20 0/0.

La construction des vaisseaux en fer motive l'emploi de cornières dont l'angle varie plus ou moins. Le pliage au marteau ou à la presse est long, peu précis. Il est préférable d'adopter une machine à galets telle que celle *figures 11* et *12* (1).

La cornière, généralement chauffée, a l'une de ses ailes maintenue entre deux ou plusieurs rouleaux A, et des disques D coniques, de manière à produire le déplacement de la cornière.

Le galet conique F peut se mouvoir transversalement et presser l'aile verticale pour la plier à l'angle voulu, réglé par la position du galet-guide E.

Si la cornière doit être ouverte, c'est le galet E qui exerce l'effort.

L'augmentation ou la diminution de l'angle primitif est indiquée par un index mobile en regard d'une échelle.

Les galets F et E peuvent être inclinés à volonté ou rechangés, de même que les rouleaux A et D d'entraînement.

---

(1) Constructeurs, MM. Davis et Primrose, Leith. *Engineering*, mars 1889.

Pliages multiples.

Les pliages multiples *(fig. 17)* se façonnent à la machine en opérant successivement, afin de ne pas déterminer de tensions excessives produisant des déchirures et exigeant une force plus grande, comme il le faudrait si tous les plis s'exécutaient d'un seul coup.

Les plieuses permettent d'obtenir toutes formes pliées ou moulurées en employant des mandrins appropriés aux plis et courbures.

Ces machines sont munies de guides réglant exactement la longueur à plier.

Le procédé de tirage entre mandrins de forme permet aussi de plier transversalement les bandes, soit en opérant par un ou par plusieurs passages successifs, si l'angle du pli est petit, La *figure 18* se rapporte à un banc à tirer les bandes minces en V.

Estampage, emboutissage.

L'estampage, variante de l'étampage, s'applique plus spécialement aux pièces de faible épaisseur, au travail de formes creuses dites *emboutis*, présentant des surfaces lisses ou des reliefs plus ou moins prononcés. Souvent, l'opération est désignée sous le nom d'emboutissage à l'étampe, pour la distinguer de l'emboutissage direct au marteau sur tas ou sur mandrin.

Les formes estampées ou embouties sont assez variables; elles dérivent de la sphère, du tore, du paraboloïde, etc., et raccordent souvent des formes cylindriques, coniques ou autres surfaces à génératrices droites ou courbes, à simple ou à double courbure.

Elles sont obtenues par flexion, par allongement ou resserrement du métal, suivant la forme à obtenir et le procédé suivi.

Emboutissage au marteau.

S'il s'agit de façonner une calotte sphérique *(fig. 1* et *2, pl. XLV)*, on découpe un faisceau ou flan de tôle circulaire, et, si on opère au marteau, au maillet sur tas bombé *(fig. 3)*, il convient de marteler d'abord la partie centrale suivant des cercles concentriques ou en spirale de manière à étendre le métal. Le flan se déforme, prend une courbure qui s'accuse de plus en plus à mesure que l'opération avance et qui s'appelle monter la pièce, puis la renfoncer. Il faut avoir soin de ménager le métal de pourtour en le retreignant ou en l'étendant peu les coups empiétant toujours les uns sur les autres.

En commençant par le pourtour du flan pour ébaucher la forme, il faudrait opérer par flexion progressive déterminant du retreint.

Les tôles pour grandes calottes ont souvent un surcroît d'épaisseur au centre pour parer à la diminution due au travail.

Il convient de donner au disque primitif un diamètre un peu plus petit que le développement de l'arc intérieur de la calotte, soit de prendre pour rayon du flan une valeur légèrement plus faible que la corde AB *(fig. 4)*, afin d'avoir peu à rétreindre sur le pourtour.

On peut aussi appliquer la relation des volumes égaux avant et après l'emboutissage; si on admet que l'épaisseur moyenne est restée égale à celle de la tôle, on peut alors se servir de la relation des surfaces :

$$\pi r^2 = \pi \, \overline{AB}^2, \quad \text{soit} \quad r = AB.$$

Pour une demi-sphère complète, l'allongement moyen du métal sera plus prononcé, ce qui permet d'obtenir une plus grande régularité.

Il est bon de tenir le diamètre de la calotte plus petit d'abord, pour ensuite rebattre toute la pièce, la planer au marteau ou au martinet si la pièce est grande.

Le métal doit être très ductile; le plomb, le cuivre, le laiton, le fer doux de bonne qualité, surtout le fer fondu, l'acier doux, s'emboutissent facilement en opérant à chaud pour les plus grandes déformations, ou à froid. en ayant soin de recuire dès que le métal s'est écroui, dès qu'il ne s'étend plus sous l'outil.

Dans l'emboutissage à chaud, il ne faut pas perdre de vue qu'il convient d'opérer au moment où le métal possède le maximum de ductilité et non pas la plus grande malléabilité.

Il faut pour chaque variété d'un métal, le cuivre par exemple, rechercher la température qui correspond au plus grand pouvoir ductile.

Une température trop élevée peut souvent être moins favorable qu'une température plus basse.

Certains échecs proviennent parfois d'un point critique de ductilité ou de la difficulté de chauffer à la température convenable les différentes parties de la pièce, ou d'éviter les inégalités de refroidissement au moment de l'opération, surtout en minces épaisseurs, quand on emploie des formes, inégalités qui déterminent des déformations anormales localisées, des déchirures ou autres défauts dus à la fissilité du métal.

On régularise parfois les calottes faites en grand nombre, comme, par exemple, celles des colonnes à distiller, au moyen d'une salière et d'un mandrin *(fig. 5)*.

Le mandrin doit forcer un peu et doit être déplacé à plusieurs reprises ou tourner. Jusqu'à 3^{mm} d'épaisseur, on peut opérer à froid; au-dessus il convient de chauffer au rouge les pièces de cuivre et de fer.

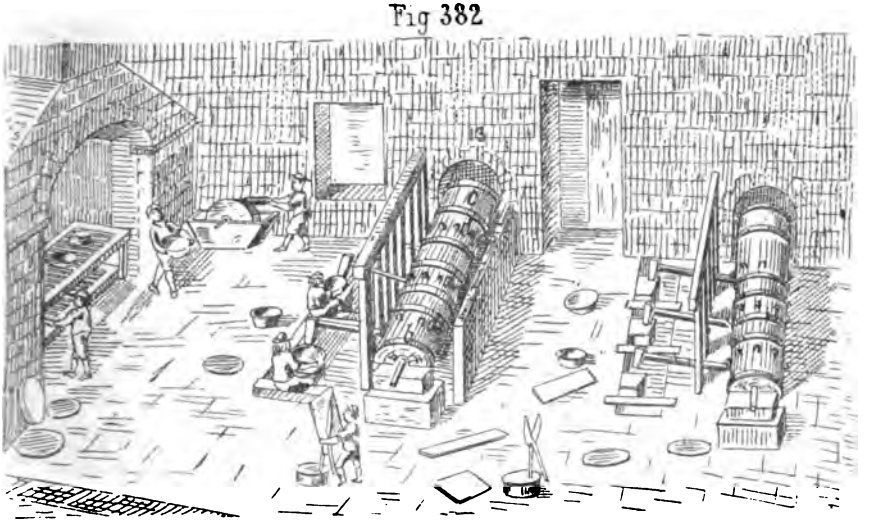
Les pièces telles que les flotteurs *(fig. 6, 7* et *8)*, les sphères sont constituées par deux calottes s'emboîtant partiellement ou s'agrafant; l'assemblage est brasé.

Le petit outillage pour le travail des emboutis comprend des marteaux, des tas divers, des mandrins ou formes, dont les *figures 9* montrent quelques modèles.

Les procédés au marteau à main sont particulièrement appliqués dans les ateliers dits de petite chaudronnerie, et ne diffèrent guère de ceux suivis autrefois et que nous croyons intéressant de signaler par l'extrait suivant de l'*Encyclopédie* (t. IX, p. 219).

Les anciennes usines où l'on façonnait les chaudières couvertes, les ustensiles de cuivre et de laiton s'appelaient des batteries.

Fig 382



La *figure 382* représente une batterie du XVIIe siècle, comprenant deux groupes de martinets actionnés chacun par une roue hydraulique.

L'arbre *bc* d'une des roues porte à sa circonférence trois rangées *d*, *d*, *d*, de douze mentonnets chacune; ces mentonnets rencontrant les queues de trois marteaux les élèvent; mais à l'échappée de la dent, ils retombent sur les enclumes.

Chaque enclume est enchâssée dans des ouvertures faites à des billots: ces billots sont des troncs d'arbres de chêne

enfoncés de trois à quatre pieds en terre, cerclés de fer, et dont les têtes sont au niveau du terrain.

» Les manches des marteaux passent dans un collet de figure ovale, dont les tourillons sont soutenus par les montants qu'on voit dans la figure citée; ces montants sont d'un pied en carré solidement assemblés par le haut à un chapeau et au niveau du terrain par une autre pièce de la même solidité, sur laquelle sont attachées des pièces de fer plates, contre lesquelles donnent les queues des marteaux : ces pièces plates font la fonction de ressort, et doublent, pour ainsi dire, le coup du marteau, qu'elles renvoient à son échappement.

» Il faut observer que les mentonnets soient distribués à ne pas élever à la fois les trois marteaux; ce qui emploierait une force immense en pure perte. Il faut que quand un des marteaux frappe, l'autre échappe et que le troisième s'élève.

» On voit, à l'extrémité de la figure, un fourneau : c'est là qu'on recuit le cuivre à mesure qu'on le bat.

» Il y a deux sortes de marteaux. Des marteaux à bassin qui ne servent qu'à abattre les plates, c'est ainsi qu'on appelle les tables destinées à faire le fil de laiton; le plus petit pèse 20 livres, et le plus gros 50.

» Entre ces deux limites, il y en a du poids de 23, 24, 26, 28 livres; ils ont tous la même figure. La pointe de quelques-uns a quatre pouces de large. Ils servent à battre les lames qui se couperont par filets pour faire le fil de laiton. Des marteaux qui ont assez la figure d'un bec de bécasse, et qu'on appelle marteaux à cuvelette, on bat avec ceux-ci les ouvrages concaves. Le plus petit est du poids de 21 livres, le plus gros du poids de 31; il y en a d'autres intermédiaires : ceux de cette espèce, dont la pointe est arrondie, servent aux petits ouvrages concaves. Il y a aussi deux sortes d'enclumes : les unes arrondies par un bout, pour les plates, les autres carrées, oblongues et plates, pour les concaves.

» On voit dans nos figures des ouvriers qui travaillent à trois

sortes d'ouvrages : l'un bat des plates qu'il tient des deux mains, les avançant peu à peu sous le marteau et parallèlement, de manière que le marteau frappe de toute sa surface. Quand le marteau a agi de cette manière, l'ouvrier expose son ouvrage à ses coups, de manière que ces seconds coups croisent les premiers.

» Quand les plaques ou pièces plates ont été martelées deux fois, comme je l'ai dit, on les recuit, en les rangeant sur la grille du fourneau, où l'on a allumé un feu clair qui dure ordinairement une heure et demie. Lorsque le cuivre est rouge, on laisse éteindre le feu, et l'on ne touche point aux pièces qu'elles ne soient refroidies. Le bois du feu à recuire est de saule ou de noisetier.

» Les pièces plates étant refroidies, on les rebat et on les recuit de nouveau. Ces manœuvres se réitèrent jusqu'à ce qu'elles aient l'étendue et l'épaisseur requises. On achève de les arrondir à la cisaille : la cisaille de cet atelier qu'on voit n'a rien de particulier. C'est ainsi que l'on prépare une fourrure; une fourrure est une pyramide de pièces battues plates, au nombre de trois à quatre cents, destinées à faire des chaudrons qui, tous plus petits les uns que les autres, entreront les uns dans les autres quand ils seront achevés.

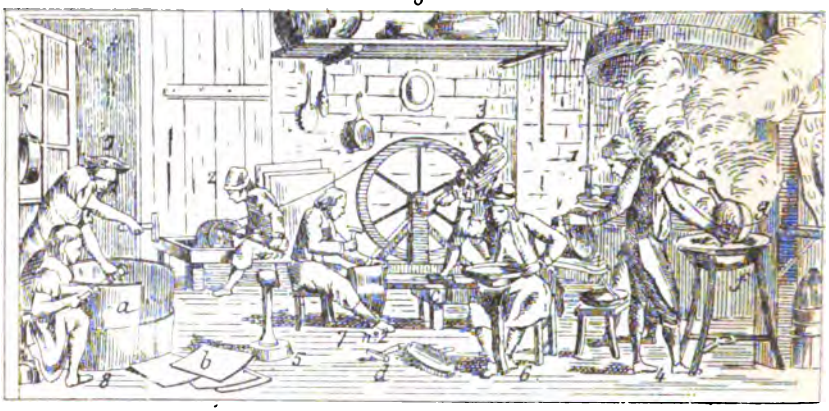
» Pour cet effet, on prend quatre de ces pièces plates, ou de ces plates tout court, pour parler comme les ouvriers. La plus grande a neuf lignes de diamètre de plus que les trois autres. On place celles-ci sur le milieu de la première dont on rabat le bord, ce qui contient les trois autres, et on les martèle toutes quatre à la fois. On se sert dans cette opération de marteaux à cuvelette, d'enclumes plates et propres à la convexité qu'on veut donner. Les chaudrons se recuisent en se fabriquant, comme on a recuit les plates. Ce travail se mène avec tant d'exactitude que tous les ouvrages se font de l'étendue rigoureuse que l'on se proposait. Les fonds des chaudrons se battent en calotte, et la cire n'est pas plus douce sous la main du

modeleur, que le cuivre sous le marteau d'un bon ouvrier.

» La lame qu'on coupera pour le fil de laiton n'a que quatre pouces de largeur, et ne se bat que d'un sens, sans croiser les coups.

» Après qu'on a battu les pièces, on les passe au tour *(fig. 383)*. »

Fig 383



Les tables ordinaires de cuivre ou de laiton variaient de trois lignes à quatre lignes d'épaisseur; les tables extraordinaires avaient jusqu'à neuf lignes d'épaisseur et pesaient de 255 à 261 livres.

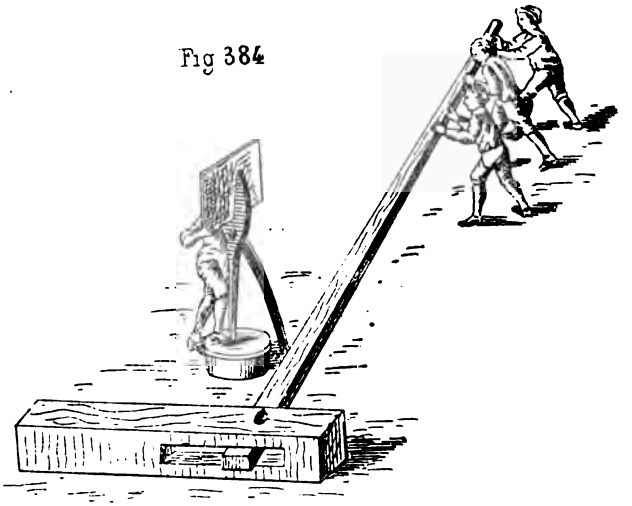
Avant de les couper à la cisaille, on les portait à la batterie pour les étendre. Elles servaient pour les fonds de grandes chaudières. Elles se découpaient avec la cisaille *(fig. 384)*, qui nous montre l'emploi simple et relativement ingénieux du levier, l'engin de force constamment employé à cette époque.

Les procédés suivis pour les objets dits de grosse chaudronnerie sont analogues à ceux de petite chaudronnerie.

Les emboutis pour fonds de bouilleurs, calottes de raccordement de sphères, calottes de grandes chaudières de 3 à 4^{m} de diamètre se font à chaud dans des formes *(fig. 10, 11* et *12*,

pl. LXV), des grandes salières, en opérant au maillet, à la masse et en les planant au martinet s'il y a lieu. Un embouti de forme ellipsoïdale ou parabolique *(fig. 14)* est pris dans un flan de diamètre compris entre 0,80 et 0,90 du développement de la ligne génératrice ABC, afin de permettre d'étendre le métal à la rectification ou planage.

Fig 384



Un dôme *(fig. 15)* à base relevée, s'appliquant sur un cylindre, s'obtient en partant d'un flan elliptique dont le petit axe $b = 0{,}8$ à $0{,}9$ de ABC et dont le grand axe est $a = 0{,}8$ à $0{,}9$ de A'B'C'.

L'emboutissage est toujours effectué progressivement en commençant par la calotte et en ébauchant en même temps le rebord qui, à chaud, se fait au maillet en rabattant sur des tas à bords arrondis. Le flan doit être plus épais au milieu que vers le pourtour, l'allongement étant plus prononcé vers le centre que vers l'extérieur.

L'ouvrier doit conserver à la pièce les formes géométriques intermédiaires aussi régulières que possible. Les pièces de

fortes dimensions se font en plusieurs parties rivées après emboutissage des éléments appelés girons *(fig. 16)*.

Les emboutis ouverts à chaque bout, dérivés de la forme cylindrique ou conique, ou raccordant ces formes, sont souvent constitués par une virole cylindrique ou conique sans soudure ou enroulée et à pinces soudées ou brasées, parfois aussi rivées.

Pour les petits diamètres, une feuille de tôle suffit; pour les gros, il faut deux ou plusieurs feuilles donnant lieu à deux ou plusieurs jonctions supplémentaires suivant les génératrices ou directrices. Par exemple *(fig. 16 bis)*, une pièce cylindrique à rebord normal raccordé par un quart de tore, sera prise dans une tôle découpée suivant le développement d'une virole cylindrique de longueur de génératrice égale à ABC ou légèrement inférieure; la longueur du faisceau sera $2\pi r$ + (20 à 60^{mm}) pour tenir compte du recouvrement de la soudure ou des agrafes.

La virole étant régularisée au plus près, soit au laminoir, soit au marteau à planer, on rabat le rebord progressivement. Le métal est allongé dans toutes les parties rabattues; il convient de ne pas exagérer le développement du raccord dont le pourtour subit un allongement proportionnel $= \frac{r' - r}{r}$.

Un raccord de tubulure *(fig. 17)* s'exécute sur ligne de brasure AB en partant d'un faisceau correspondant à peu près au cône moyen CDE raccordé avec le développement du cylindre formant le tuyau.

Il convient de rabattre en grande partie la collerette avant d'enviroler, ou plutôt, l'envirolage se fait progressivement en formant le raccord, puis la brasure faite, il ne reste plus qu'à régulariser la pièce.

Pour des formes à deux raccordements, telles que les cuissards de chaudières, le développement correspond *(fig. 18)* à celui du cylindre de longueur moyenne l, de diamètre d,

coupant les pièces cylindriques raccordées; la hauteur *l* comprend un excès correspondant de chaque côté à la largeur de la collerette en ses divers points.

La virole est cintrée, puis soudée, puis emboutie à chaud au maillet et au marteau sur tas convenables. Si le rebord est prononcé, il faut le rabattre en partie tout en envirotant; il faut atténuer ou prévenir les différences d'épaisseur par un découpage ne nécessitant pas, pour certaines parties, un allongement trop développé.

Si la pièce est conique, le faisceau correspond *(fig. 19)* au développement du cône A, B, C, D, avec supplément de bande égale au rebord. Il convient, lorsque les pièces se répètent, d'établir les gabarits des développements.

Parfois, le raccord à emboutir est à pourtour carré ou rectangulaire *(fig. 20)*. Dans ce cas, on donne à la partie cylindrique ou conique ABCD une faible hauteur *h*, qui est obtenue par relèvement du faisceau correspondant au développement du cône moyen A'E'F'D', auquel développement on ajoute une bande de hauteur *h* que l'on commence d'abord à relever avant le cintrage de la pièce. Les parties embouties sont ensuite achevées suivant gabarit.

Les pièces de formes tourmentées plus ou moins régulières (telles que celles *fig. 21*) s'exécutent en s'inspirant des mêmes principes et procédés, soit par relèvement, cintrage, emboutissages partiels successifs. Souvent les pièces compliquées sont décomposées en parties plus simples que l'on réunit ensuite par rivures ou brasures.

Une portion de tore ABCD *(fig. 22)* sera emboutie, de préférence, dans un cône moyen A'B'C'D' dont les parties vers D' et C' seront étendues et dont la partie médiane M sera rétreinte. Le cône est développé suivant un faisceau A, B, C, D, que l'on cintre; la jonction étant brasée, on procède à l'emboutissage.

La partie retreinte sera d'autant plus petite que l'on désirera

davantage étendre le métal des autres parties, ce qui facilitera toujours la conduite du travail.

Un autre procédé, employé pour les petites pièces, consiste à cintrer le faisceau A, B, C, D, suivant une courbure approchée de celle du tore, puis à cintrer suivant l'axe du tore, et à braser ensuite le joint.

C'est ainsi que l'on opère pour les demi-tores *(fig. 23)* en prenant pour point de départ un faisceau rectangulaire correspondant au cylindre moyen. Si la pièce est de grand diamètre, le demi-tore est formé de segments égaux brasés. Pour un coude *(fig. 24)*, le demi-tore est constitué par deux parties brasées suivant les circonférences moyennes.

Estampage ou emboutissage en étampes.

Lorsque les formes permettent l'emploi de mandrins, d'étampes ou matrices, l'emboutissage se fait à la presse ou au mouton, par une seule opération si la déformation est peu prononcée. Dans le cas contraire, l'emboutissage en étampes comporte une série plus ou moins nombreuse de passages dans des étampes progressives et exige plusieurs recuits si on opère à froid, un réchauffage à chaque opération quand on opère à chaud.

Ces opérations successives ont pour but d'éviter des ondulations prononcées, des déchirures du métal.

Les pièces ont généralement la forme de révolution donnant lieu à un flan de départ circulaire.

Si la déformation est trop forte, il se produit des plis tels que ceux *figure 25* ou des arrachements *(fig. 26)*.

Les calottes des dômes sont ainsi moulées dans des formes, et pour préparer les fonds de chaudières de sucrerie on fait usage de pilons de 10 à 25^{t}, ou de presses.

Les outils pour pièces à rebords d'équerre cylindriques telles que les fonds de récipients ne se prêtant pas à la formation d'un angle aigu pour le rebord devenant un angle droit après

refroidissement complet, il s'ensuit que le rebord fait un angle obtus, c'est-à-dire affecte une forme conique, ce qui nécessite une façon supplémentaire (réchauffage et redressage) que l'on peut éviter en plaçant la pièce, au sortir de la presse, dans un mandrin de forme finale emboîtant le rebord avec serrage réglé à volonté pour assurer la forme cylindrique exigée.

L'emboutissage en étampes est beaucoup plus rapide que celui au marteau; mais il nécessite de nombreux mandrins ou matrices de dimensions convenables, tandis qu'avec le procédé de martelage, ces mandrins ou tas sont très réduits.

L'estampage est particulièrement avantageux lorsque les pièces se répètent en grand nombre et que l'on peut opérer d'un seul coup, par exemple *(fig. 27* et *28)*, pour la confection des versoirs de charrues, des tuiles métalliques, pour les traverses des voies ferrées, etc.

Les ébauches ou flans des pièces minces sont préparées de manière que, dans l'opération finale, il n'y ait pas de réduction d'épaisseur à produire, sinon les efforts à développer seraient très élevés. Il convient cependant que la forme soit donnée par une pression assez énergique que l'expérience seule peut indiquer pour chaque cas d'application.

La percussion est appliquée à l'estampage des petites pièces n'exigeant pas de déformations prononcées, autrement l'action rapide de l'outil produirait des déchirures.

Les pièces de taillanderie, de ferblanterie, quantité d'outils en tôle, s'estampent au mouton ou au marteau-pilon à vapeur, dont la base est disposée *(fig. 29* et *30)* pour recevoir les étampes.

S'il s'agit d'emboutis prononcés, on adopte de préférence la presse et on cherche, autant que possible, à réduire le nombre d'opérations en maintenant le métal et en l'empêchant de se plisser irrégulièrement. Par exemple, considérons le cas d'un emboutissage cylindrique fait à la presse *(fig. 31)* (1). Le flan

(1) Machine modèle Bidault.

circulaire est placé sur le mandrin J fixe inférieur servant d'appui *(fig. 32* et *33)*. Il déborde sur une collerette R qui suit le mouvement vertical du mandrin I actionné par la bielle articulée avec la manivelle coudée de l'arbre de commande supérieur. En même temps, un piston logé dans l'intérieur du mandrin I, et sollicité par un ressort à boudin, maintient le flan sur l'about du mandrin J. Il s'ensuit que la tôle est constamment tenue en tous ses points lorsque I descend et produit la première ébauche. Les formes ultérieures *(fig. 34)* s'obtiennent d'une façon analogue.

Les *figures 35* se rapportent à une pièce moulurée obtenue en deux passes avec un flan de laiton de 1^{mm} d'épaisseur.

Signalons aussi la disposition *(fig. 36)* pour emboutir des flans de mince épaisseur en une passe.

Le mandrin inférieur est constitué par un bloc B évidé en cône dans lequel sont disposées de nombreuses bagues superposées. Le mandrin supérieur est formé d'un pousseur A emboîté par une série de bagues C qui se déplacent verticalement, de manière à venir successivement maintenir la pièce contre la paroi intérieure formée par les bagues B.

De plus, des barres D servent au début de l'opération à maintenir le bord du flan. Ces barres sont distribuées sur tout le pourtour en nombre convenable.

Le flan F étant présenté, est poussé par A et par les différentes bagues C dont le déplacement s'arrête lorsqu'il y a contact de la tôle avec le mandrin inférieur; cette tôle sera maintenue sur tout son pourtour lorsque le pousseur arrivera près de l'ouverture inférieure munie d'une filière I calibrant l'embouti cylindrique qui se développe, si on le veut, en un tube T de grande longueur et de petit diamètre *(fig. 37)*, ce qui caractérise, non plus un emboutissage, mais un véritable étirage, de sorte que l'opération comporte deux parties bien distinctes.

Plus simplement, la matrice d'étirage, au lieu d'être très

arasée *(fig. 38)* et à paroi lisse, offre un profil à redans *(fig. 39)* (1).

Le profil des redans peut être courbe ou rectiligne, ou composé de parties droites et courbes.

Chacun des échelons de la matrice peut être, néanmoins, constitué d'une bague distincte.

Cette disposition, au nombre des avantages qu'elle présente, facilite le graissage; le lubrifiant, étant emprisonné, remplit bien sa fonction de diminuer le frottement et de permettre au métal de se déformer dans de meilleures conditions sous l'action simultanée du mandrin et de la matrice.

Le tracé à redans est également appliqué avantageusement aux matrices d'emboutissage proprement dit.

Le graissage se fait avec des huiles et graisses consistantes mélangées de plombagine ou d'un élément métallique, tel que le cuivre dissous sous forme de sulfate.

Pour la confection, d'un seul coup, d'emboutis en partie conique et en partie cylindrique *(fig. 1, pl. LXVI)*, ou pour des emboutis cylindriques profonds, il est nécessaire de bien maintenir le flan en vue d'éviter le plissage, et de produire la déformation en passant par la forme conique pour arriver à la forme cylindrique.

Les mandrins de la presse sont disposés pour agir au moment voulu. Ainsi, dans la machine *(fig. 2 et 3)* (2), le premier mandrin supposé cylindrique est monté sur le plongeur F *(fig. 4)* dont l'extrémité est pourvue d'une partie filetée formant écrou pour recevoir le mandrin. Sur un plongeur annulaire H emboîtant F est vissé le mandrin, de forme intermédiaire, destiné, le flan étant appuyé, à produire une descente préparatoire à la descente finale opérée ensuite par le mandrin fixé sur le plongeur F.

Sur un troisième plongeur J est vissée la bague de tenue du flan servant à l'appuyer sur la matrice, pendant que les man-

(1) Brevet à MM. Schneider et Cie, du 10 avril 1884.

(2) Machine à emboutir de Delizy et Audin. Brevet du 11 juin 1890.

drins opèrent sous l'action des divers organes qui produisent leurs mouvements respectifs. La table inclinée de la presse ci-dessous facilite la tombée de la pièce à travers la paroi du bâti.

Les presses à emboutir présentent de nombreux modèles dont nous ne pouvons signaler que quelques-uns *(pl. XLVI)*.

Les presses à vis *(fig. 5* et *6)* sont employées pour petites dimensions, elles sont actionnées à la main.

Avec une commande mécanique, on adopte de préférence les presses à arbre coudé. Celle *figure 7*, modèle de M. Deny, est disposée horizontalement.

Pour de petits emboutis, le mandrin inférieur est quelquefois à revolver *(fig. 8)*, c'est-à-dire présente plusieurs empreintes pratiquées dans une même plaque qui pivote autour d'un axe, de manière à amener successivement chaque empreinte en regard de l'outil supérieur. On construit des presses verticales à coulisseau commandé par bielles et manivelles de grande puissance et dont le poids dépasse 50^{t}.

Parfois, comme *figure 9*, modèle Bliss, de Brooklyn, le moteur à vapeur actionne directement la presse, qui peut recevoir des flans jusqu'à 1^{m},50 de diamètre, avec mandrin de 1^{m},40.

Nous ne pouvons entrer dans le détail de la marche de ces machines dont le réglage des positions relatives des étampes à fond de course est très important.

Il faut opérer l'emboutissage des premières pièces avec précaution et les vérifier; ce sont des essais préalables qu'il est nécessaire de faire dans la plupart des fabrications.

Si un premier objet a des plis sur tout son pourtour, c'est que le flan n'est pas suffisamment maintenu sur la bague d'appui.

Des plis qui se trouvent sur un seul côté indiquent que le flan n'est pas assez serré de ce côté. Il faut régler les appuis en conséquence.

Si le fond de la pièce se détache, c'est que la course relative des outils est trop longue, il faut la raccourcir. Un fond insuffisamment serré indique une course relative trop faible. Une pièce gauchie est l'indice d'une action non symétrique des pressions.

Il est indispensable aussi de bien graisser les mandrins pour réduire les frottements.

Les divers mécanismes agissant sur les mandrins ne doivent présenter aucun jeu d'usure, surtout lorsque l'emboutissage comporte de faibles épaisseurs.

L'emboutissage des grosses pièces de chaudronnerie exige l'emploi de fortes presses hydrauliques ou à vapeur dont les tables ou plateaux sont convenablement disposées pour y fixer les étampes. Celles *figures 1* et *2*, *planche XLVII*, servent spécialement pour le travail de pièces moyennes telles que bouchons de bouilleurs, autoclaves, creusets en tôle, augets de dragueuses, d'élévateurs, petits pistons, disques de cisailles, etc.

Les presses *figures 3* et *4* sont employées pour l'emboutissage des fonds de corps cylindriques, de plaques tubulaires, gros pistons, dômes de foyers, ébauches de récipients, de tuyaux sans soudure, calottes de triple effet, sommiers de wagons, godets de dragues, etc. *(fig. 23* à *29*, *pl. XLVII)*.

Les presses agissant sous l'action d'un liquide ou de tout autre fluide n'ont pas les inconvénients des presses à mécanismes rigides. On peut régler l'intensité des efforts à volonté et, dans une certaine limite, la vitesse de l'opération, en introduisant plus ou moins rapidement le fluide moteur.

La presse à vapeur *(fig. 5)* est aussi d'un bon usage pour les emboutissages de fortes dimensions; elle permet de donner rapidement plusieurs pressions énergiques vives.

Effort d'emboutissage.

Si l'on veut apprécier, comparer approximativement les efforts qu'exige l'emboutissage de pièces semblables dans des conditions analogues au moyen de la presse, on pourrait appli-

quer les formules de flexion des pièces circulaires posées sur leur pourtour et pressées au milieu ou sur une partie de leur surface.

Mais, les conditions d'application de la pression étant très variables, de même que les diamètres des surfaces d'appui, il s'ensuit que les efforts varient beaucoup pendant l'opération, ainsi que le montrent les quelques essais ci-après. On est conduit à considérer le maximum de la pression. Ordinairement, ce maximum correspond à la fin de l'emboutissage, au moment où un certain étirage se produit, ou tend à se produire. Il suffit alors de rapporter l'effort P à la section annulaire de l'embouti, soit en posant :

$$P = \frac{\pi (d^2 - d'^2)}{4} R,$$

et du diamètre moyen d,

$$P = \pi d e R.$$

Le coefficient de résistance R fictif ou réel serait :

$$R = \frac{4P}{\pi (d^2 - d'^2)}$$

ou

$$R = \frac{P}{\pi d e}$$

Essais d'emboutissage.

Les éléments des essais consignés dans le *tableau 35* et la *figure 385* se rapportent aux variations de l'effort d'emboutissage ordinaire.

L'essai n° 4 fait ressortir que la limite de l'effort correspond à la résistance de rupture par traction de la section annulaire, résistance qui se manifeste dès que l'embouti se développe sous la forme cylindrique. Il convient donc, pour ne pas arracher le fond, d'adopter une différence de section de la matrice et du mandrin ne produisant pas un trop fort étirage.

Ordinairement, on adopte une réduction qui correspond à la disparition des plissures de retreignage. De plus, quand on

Essais d'emboutissage.

Tableau n° 35.

N° D'ORDRE	DÉSIGNATION de L'ÉPROUVETTE	DIAMÈTRE	SECTION	ENFONCEMENT	EFFORTS	OBSERVATIONS
1	Rondelle de cuivre non recuit de 3mm d'épaisseur	50,7		1	kg 330	Le mandrin ayant un diamètre trop faible, la pièce se déforme non uniformément.
	Matrice	43,8	1506,7	2	400	
	Mandrin	27,4	589,7	4	550	
	Section annulaire . .		917,0	6	760	
				8	950	Le mandrin s'engage brusquement à 980kg.
				9	980	L'effort maximum rapporté au millimètre carré de section annulaire est $R = \frac{980}{917} = 1^{kg},34.$
2	Rondelle de cuivre recuit, de 3mm d'épaisseur	51		1	80	L'embouti est de travers. En pratique, on rectifie le bord à la scie ou au tour, pour l'étirer s'il y a lieu.
	Matrice	33,5	881,41	2	120	
	Mandrin	24,3	463,80	3	180	
	Section annulaire . .		417,61	4	270	
				6	380	
				8	760	
				10	1.000	
				12	1.660	
				14	2.350	
				16	2.720	
				18	3.030	$R = \frac{3.140}{417,61} = 7^{kg},54.$
				19 à 21	3.140	
				22	3.000	
				25	2.400	
3	Rondelle de cuivre non recuit, de 3mm d'épaisseur	45		1	80	La hauteur de l'embouti était de 18mm,7.
	Matrice	33,7	892,0	2	110	
	Mandrin	26	530,8	3	130	
	Section annulaire . .		361,2	4	210	
				6	380	
				8	600	
				10	1.220	$R = \frac{2\ 200}{361,2} = 6^{kg},1.$
				12	1.660	
				14	2.160	
				15 à 17	2.210	
				18	2.160	Enfoncement brusque.
				19	1.700	
				20	1.510	
4	Rondelle de cuivre non recuit, de 3mm d'épaisseur	39		1	220	Le culot s'est arraché, rupture qui montre que le diamètre du mandrin était trop petit; le métal subissait au moment du déchirement une traction de 24kg par millimètre carré de section annulaire.
	Matrice	18,6	271,8	2	340	
	Mandrin	14,8	172,0	3	340	
	Section annulaire . .		99,8	4	440	
				5	550	
				6	570	
				7	840	
				8	960	
				9	1.300	
				10	1.700	
				11	1.981	
				12	2.200	
				13	2.400	$R = \frac{2.400}{99,8} = 24^{kg},01.$

opère en étampes fermées et que l'on serre fortement le métal entre les outils, l'effort maximum d'emboutissage est augmenté dans une grande proportion pour donner lieu à une compression énergique finale analogue à celle développée pour le matriçage.

Suivant les pièces, la valeur de cet effort est appréciée directement sur la machine dont on se sert, la pression par unité de surface pouvant atteindre de 1 à 30^{kg} par millimètre carré et parfois plus, selon le métal et sa température.

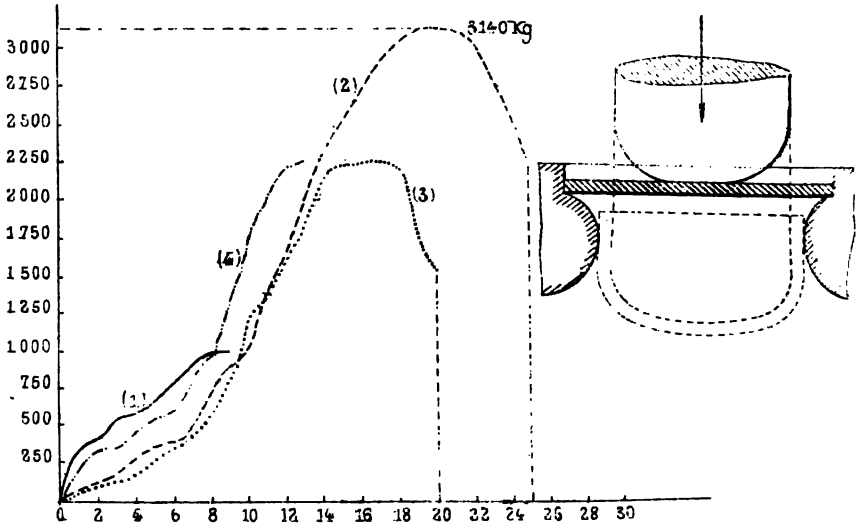


Fig. 385.

En opérant sur des disques de fer fondu extra-doux recuit de 340^{mm} de diamètre et d'épaisseur e variable, avec un mandrin de 160^{mm} de diamètre, celui de la matrice étant de $(160 + 2{,}2\,e)$, de manière à obtenir des emboutis à peu près semi-sphériques sans étirage, le rapport de l'effort maximum à l'épaisseur croît quelque peu ainsi que le font ressortir les valeurs suivantes :

Epaisseur du disque.	$e =$	5	8	10	15	18	20mm
Effort maximum . .	$P =$	29.300	53.500	66.900	109.000	132.000	152.000kg
Rapport	$\frac{P}{e} =$	5.860	6.680	6.690	7.266	7.333	7.600
Charge par mm² de section annulaire . .	$R =$	9,4	10,2	10	11,5	11,7	12k

Les valeurs de R permettent de déduire assez approximativement l'effort maximum nécessaire pour emboutir à chaud au rouge cerise, sans étirage, les grosses pièces telles que fonds de bouilleurs, plaques tubulaires, en adoptant un coefficient R d'environ le cinquième de celui qui correspond à ceux ci-dessus. Ainsi, pour un embouti de 1m de diamètre en tôle de fer de de 15mm d'épaisseur, la section annulaire étant très approximativement $\pi dc = 3{,}14 \times 1000 \times 15 = 47.100^{mm^2}$, la valeur de R étant prise égale à 2kg, l'effort maximum serait 94.200kg.

Emboutissage par pression directe d'un liquide.

L'emboutissage des métaux à froid de faible épaisseur se fait aussi en faisant agir directement un liquide sous pression.

Le flan F *(fig. 386)* étant appliqué sur la partie plane de l'étampe E, on le maintient suffisamment serré sur le dessous d'étampe E' et sur joint étanche. Le liquide, sous pression, étant introduit au-dessous du flan, oblige celui-ci à prendre la forme de l'empreinte. Nous ne retrouverons guère ce procédé que dans quelques cas spéciaux, tels que celui de l'emboutissage des viroles ondulées d'enveloppes de cartouches. Il ne convient pas pour les pièces courantes; les manœuvres et la condition d'étanchéité du joint sont trop assujettissantes.

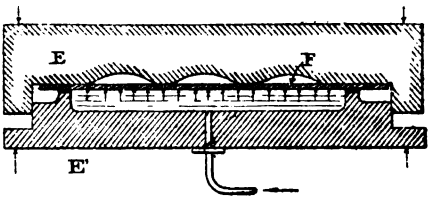


Fig. 386.

On préfère, particulièrement quand on opère à chaud, faire

agir le liquide directement sur les étampes, ainsi que nous aurons l'occasion de le signaler dans la deuxième partie.

La pression d'un fluide à l'intérieur d'une pièce emboutie telle qu'un récipient, un vase, peut être utilement employée pour rétablir la forme primitive lorsque la pièce s'est déformée. C'est ainsi qu'un flotteur de forme sphérique bosselée, rempli de vapeur ou de préférence d'eau sous pression, peut reprendre sa forme régulière.

Repoussage.

L'emboutissage dit repoussage est obtenu en donnant à la pièce un mouvement de rotation pendant qu'un outil repousseur force le métal à épouser l'empreinte d'un mandrin. Réciproquement, les outils peuvent tourner et la pièce être fixe. Ce procédé ne peut s'appliquer qu'à des formes de révolution. Il est surtout employé pour achever les pièces embouties à la presse, pour faire disparaître les traces des plis.

L'outil est, soit un morceau d'acier tenu à la main ou au chariot, soit une roulette d'acier qui évite le frottement.

La machine à emboutir est analogue à un tour. Celle *figure 6, pl. XLVII,* comporte la disposition avec pièce rotative et outil à roulette montée sur chariot double. Un pousseur P maintient la pièce sur le mandrin pendant l'opération de serrage ou de planage.

La *figure 7* est une emboutisseuse à outils rotatifs. Chaque roulette est montée sur un plateau, et peut être éloignée ou rapprochée du centre à volonté en actionnant une vis de manœuvre. La pièce est placée sur son support fixe entre les deux plateaux dont on règle l'écartement à volonté.

C'est par les procédés d'estampage au tour que l'on forme, avec des tubes droits ou coniques, des pièces creuses de forme quelconque en modifiant les sections, les profils, en pratiquant des ornements, des saillies et creux parallèles, rectilignes ou hélicoïdaux, réguliers ou irréguliers, plus ou moins prononcés,

des façons les plus variées. Pour cela, sur un disque A *(fig. 8)* qui peut se déplacer dans le sens de son axe en tournant, on monte un certain nombre d'outils repousseurs pouvant, s'il est nécessaire, se mouvoir transversalement à l'axe de rotation, suivant les déformations à produire. Ces outils sont disposés sur un plateau universel actionné automatiquement ou à la main et suivant un gabarit correspondant à la forme à obtenir. Par exemple, pour façonner la pièce *figure 9*, on commence en partant de M à mouvoir lentement le disque A en avant pendant la rotation de la pièce; on rapproche les outils à deux époques différentes et on les écarte aux diamètres renflés, pour les rapprocher de nouveau aux diamètres réduits vers le pied. En combinant les déplacements de la pièce et des outils, on obtient toutes formes *(fig. 10)*.

L'emboutissage des formes de révolution provenant de flans cylindriques ou coniques, telles que les semi-tores, les moulures, les ondulations de viroles, est obtenu par le procédé de laminage progressif entre deux cylindres ou galets de forme analogue à ceux *figures 11* et *12*.

C'est un cas particulier du laminage.

A titre d'exemple d'emboutissage prononcé combiné avec le laminage ou repoussage au moyen de galets, signalons la fabrication des seaux en fer :

Le flan de forme circulaire *(fig. 13)* a une épaisseur précisément égale à celle que l'on veut donner au seau achevé. L'emboutissage s'effectue à froid et sans diminution sensible de l'épaisseur pendant les diverses phases du travail qui comprend une première opération *(fig 14)*, qui consiste, le flan A étant posé sur une matrice cylindrique B, à faire descendre sur le rebord de cette matrice une collerette C qui, sous l'action d'une presse hydraulique ou mécanique, exerce sur le pourtour du flan une pression destinée à le maintenir solidement pendant l'emboutissage, au moyen du piston D s'ajustant exactement dans la collerette et descendant dans le cylindre B, dont le

rayon n'excède celui du piston D que d'une quantité sensiblement égale à l'épaisseur même de la tôle.

Les bords supérieurs du cylindre B étant arrondis lorsque le piston D descend, le métal se replie régulièrement en s'étirant un peu, et descend avec lui dans le cylindre B, où il prend la forme E *(fig. 15)*. Cette première passe donnée, la pièce E est portée sur une autre matrice *(fig. 16)* formée d'un cylindre ayant un diamètre d'environ $0^m,05$ plus étroit que le précédent; sur le pourtour et à l'intérieur de la pièce, on fait descendre une collerette de serrage C' qui en presse fortement le bord sur la partie supérieure du cylindre B'; puis le piston D' descend en obligeant le métal à s'emboutir et à s'étirer légèrement sur le pourtour supérieur arrondi du cylindre B', et la pièce prend la forme E' *(fig. 17)*.

L'opération se continue ainsi dans des matrices de plus en plus étroites, la pièce gagnant à chaque fois en profondeur ce qu'elle perd en diamètre.

Toutefois, ce travail ayant pour effet de rendre le métal aigre et cassant, il est indispensable de le recuire après qu'il a subi deux ou trois emboutissages successifs.

Le recuit se fait dans un four *(fig. 18)*, les pièces à recuire étant placées dans des récipients métalliques I prévenant l'attaque des flammes.

Il peut aussi arriver que, pendant la série des opérations, il se produise accidentellement, sur le pourtour de la pièce, des plissements nuisibles à la suite des opérations.

On fait disparaître les plis, sur recuit préalable, en montant la pièce sur un mandrin *(fig. 19)*, solidaire d'un arbre à plateau tournant; puis on fait agir une molette O, montée sur le chariot du tour qui se déplace à volonté pour agir sur les parties défectueuses.

La forme du seau étant cylindrique à ce moment du travail, il faut lui donner la forme conique.

A cet effet, on le soumet à un emboutissage entre une

matrice P *(fig. 20)* et un mandrin Q qui lui donne sa forme. On applique ensuite la pièce, dans une matrice conique X fixée sur un tour *(fig. 21)*, et on l'y maintient solidement pour faire agir à l'intérieur une molette S montée sur un bras T solidaire du chariot du tour.

En quelques passes, la conicité est obtenue.

Enfin, un dernier emboutissage entre une matrice V et un mandrin conique V *(fig. 22)* lui donne sa forme définitive.

Il suffit alors d'y rapporter les oreilles de l'anse et d'y souder à sa base la collerette d'appui.

Le seau est ensuite soumis à la galvanisation.

CHAPITRE VII

Procédés par torsion.

La torsion, c'est-à-dire la déformation angulaire des fibres ou molécules autour de l'axe longitudinal de la pièce, donne lieu à des formes hélicoïdales.

La torsion peu prononcée est appliquée pour amener certaines parties d'une pièce dans des positions voulues.

Par exemple : pour régler exactement l'angle des coudes d'un arbre coudé à deux ou plusieurs vilebrequins. Parfois, le déplacement angulaire est relativement élevé; ainsi, lorsque les trois coudes d'un arbre *(fig. 387)* sont forgés dans le même plan et qu'il faut les amener dans trois directions de 120°.

Le déplacement angulaire relatif des fibres est d'autant plus grand que la longueur entre les coudes est plus petite. Il convient d'opérer à chaud pour réduire le moment de torsion et faciliter les déplacements moléculaires.

La torsion est encore appliquée à la déformation de paquets ou trousses de fer et d'acier pour la confection des armes, et cela, en vue d'obtenir au polissage des lignes formant des dessins réguliers et variés suivant la composition du paquet et le mode de fabrication. On la retrouve aussi dans le laminage des tuyaux, de barres entre disques rotatifs, dans les tuyaux cannelés et tirés au mandrin, dans les tiges de pistons pour prévenir les solutions d'homogénéité suivant les génératrices.

Dans les chaînes dites à maillons tordus, ce procédé s'applique à chaud, de même que pour obtenir des pièces diverses d'outillage, des leviers, des clés à écrous *(fig. 387)*.

Divers outils, tels que mèches, affectent aussi cette forme qui donne une meilleure coupe et un plus facile dégagement du copeau.

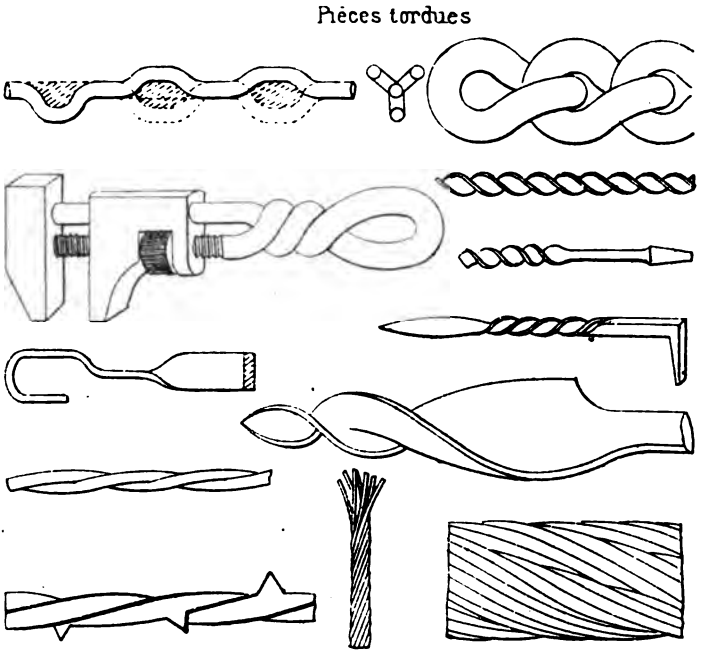


Fig. 387.

On la retrouve encore dans les tiges en vrille, dans des pièces à section rectangulaire dont on veut assurer la rigidité dans toutes les directions transversales.

Le câblage des fils métalliques donne également lieu à l'application des procédés de torsion, qui, en somme, sont très limités.

CHAPITRE VIII

Chauffage et refroidissement.

Le chauffage, puis le refroidissement partiel de certaines pièces permettent de modifier quelque peu la forme et les dimensions. De plus, le chauffage et le refroidissement plus ou moins rapide constituent pour l'acier un procédé de travail ayant une grande influence sur la constitution physique de ce métal; de même, le réchauffage et le refroidissement lent ont également une importance pour la mise en œuvre des divers métaux forgés.

Dans ces opérations, l'outil proprement dit n'intervient pas; elles forment donc une catégorie spéciale dont les engins utilisés sont : un foyer ou une source de chaleur; d'autre part, un bain réfrigérant.

Modification de la forme et des dimensions.

Le procédé est appliqué pour transformer les cercles, les frettes cylindriques en frettes coniques (1). En chauffant au rouge une virole de mince épaisseur, puis la refroidissant dans l'eau sur une partie de sa hauteur, la moitié, le diamètre de cette partie refroidie diminue par la contraction rapide; la portion restée chaude est sollicitée par le rétrécissement; le métal se

(1) Procédé appliqué en premier lieu par M. Clerk, il y a une quinzaine d'années.

comprime, tend à prendre une forme fléchie près de la région refroidie. La contraction du métal chaud se faisant ensuite de proche en proche, la virole accuse finalement une forme conique dont l'inclinaison de la génératrice croît avec le nombre d'opérations que l'on fait subir à la pièce.

Ainsi, une virole de diamètre primitif égal à d *(fig. 388)*, étant chauffée uniformément, prend un diamètre $d' > d$. La partie refroidie rapidement reprend sensiblement son diamètre primitif d; la contraction se propage, réduit la partie toujours chaude à un diamètre d'' intermédiaire entre d et d'. Puis le refroidissement ultérieur de cette partie chaude donne un diamètre d''' plus petit que d.

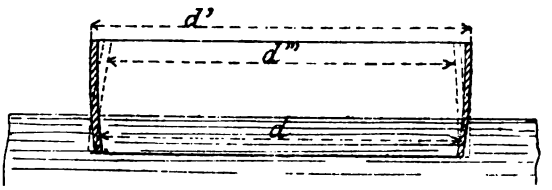


Fig. 388.

Dans un essai, une virole de 320^{mm} de diamètre moyen d, de hauteur = 100^{mm}, et d'épaisseur = 8^{mm}, a donné après le

		$\frac{d}{2}$	$\frac{d'''}{2}$
1er	refroidissement	320,5	319^{mm}
2^{e}	id.	321	318
3^{e}	id.	322	316
4^{e}	id.	322	314
5^{e}	id.	322	312

soit une différence de diamètres moyens 322 − 312 = 10^{mm}.

Notons que le diamètre du côté constamment refroidi a pris un accroissement de 2^{mm}.

Le procédé de retreignage par chauffage et refroidissement est quelquefois appliqué aux bandages des roues de véhicules

lorsqu'il faut réduire le diamètre de quelques millimètres ou même de quelques centimètres, en chauffant, puis refroidissant alternativement de chaque côté. Suivant la température de chauffage et celle de refroidissement, un bandage de wagon de 1^m de diamètre peut être réduit de $0^m,01$ à $0^m,02$ en deux opérations.

De même, les frettes elliptiques des manivelles coudées des essieux de locomotive se retreignent à volonté de plusieurs millimètres par cette opération.

Si les manipulations se répètent, il y a lieu de craindre avec l'acier des tapures; si c'est du fer soudé, le dessoudage des mises peut se produire. Il est préférable de procéder par mandrinage extérieur.

Pour des pièces annulaires de faible hauteur relative, telles que les frettes, et lorsqu'il suffit d'augmenter un peu le serrage à l'emboîtement, on peut ovaliser l'anneau par une ou deux opérations comprenant : un chauffage général, puis un refroidissement partiel rapide de la moitié de l'anneau suivant *cbd* (*fig. 389*). Un accroissement de diamètre se fait vers la partie restée plus longtemps chaude et qui a fléchi, une diminution de diamètre se détermine suivant *cd*.

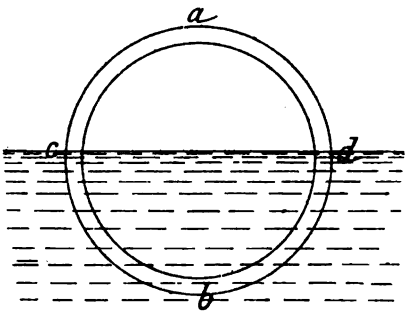


Fig. 389.

En répétant l'opération et refroidissant sur *cad*, le nouvel accroissement se fait vers *b* et s'ajoute au précédent.

Le serrage de la frette peut ainsi être plus accentué, mais il ne se répartit plus uniformément.

En continuant les opérations sur le diamètre *cd*, la pièce tend à reprendre sa forme annulaire en conservant une légère

Essais de retreignage par chauffage et refroidissement.

Tableau n° 36.

N°s D'ORDRE	DÉSIGNATION DE L'ÉPROUVETTE	Refroidissement suivant	VARIATIONS DES DIAMÈTRES — EXTÉRIEURS *ab*	EXTÉRIEURS *cd*	EXTÉRIEURS Différence	INTÉRIEURS *ab*	INTÉRIEURS *c l*	INTÉRIEURS Différence	OBSERVATIONS
1	Rondelle de fer chauffée entièrement et refroidie partiellement. Diamètre primitif extérieur 82,92 Diamètre primitif intérieur 49,90 Épaisseur 10mm	*cbd* *cad* *adb* *acb*	0,12 0,18 0,05 — 0,10	— 0,10 — 0,21 — 0,11 — 0,10	0,22 0,39 0,16 0,00	0,10 0,20 0,10 0,00	— 0,08 — 0,10 — 0,05 — 0,05	0,18 0,3 0,15 0,05	La bague est restée finalement cylindrique à quelques centièmes de millimètre près. La diminution du diamètre extérieur et l'augmentation du diamètre intérieur peuvent être attribuées à la formation des pellicules d'oxyde enlevées après chacune des quatre opérations.
2	Rondelle de fer chauffée partiellement au rouge sur 1/3 environ de son pourtour et refroidie dans l'eau sur l'autre partie. Diam. primitif extérieur : 88,4 ; diam. prim. intérieur : 62,8 ; épaiss. : 12,8	*cbd* *cad* *adb* *acb*	0,34 0,52 0,43 — 0,40	— 0,13 — 0,48 — 0,26 + 0,10	0,47 1,00 0,69 0,70	0,35 0,70 0,10 — 0,20	— 0,21 — 0,45 — 0,70 — 0,90	0,56 1,15 0,80 0,70	La déformation n'est pas symétrique. La bague emboîtée sur un mandrin porte à peine sur 3 à 4mm. Les chauffes successives n'ont pas produit de déformation sensible, si ce n'est dans la partie où elle s'est localisée.
3	Anneau de fer chauffé sur le 1/3 du pourtour avec refroidissement à l'air. Diamètre moyen : 49,07 ; Section circulaire de 20mm de diamètre.	*cbd* *cab* *adb* *acb*	1,10 1,60 0,80 0,40	— 0,80 — 1,00 — 0,40 — 0,20	1,90 2,60 1,20 0,60	» » » »	» » » »	» » » »	Le chauffage étant plus ou moins régulier, les déformations, d'ailleurs peu importantes relativement, donnent une ovalisation qui persiste malgré des chauffes répétées au même endroit.
4	Frette en acier fondu d'essieu de locomotive. Grand axe intér. 350mm ; petit axe intér. 340 ; section 40 × 100.	*cbd*	0,00	0,15	»	»	»	»	Chauffée au four et refroidie dans l'eau jusqu'au niveau du grand axe sur la moitié, on ne constate pas de déformation appréciable.
5	Bandage de roue de wagon en acier chauffé au four et refroidi dans l'eau sur la moitié de son pourtour. Diam. prim. int. 1,100 ; épaiss. moy. 0,040	*cbd* *cad* *adb* *acb*	» » » »	» » » »	» » » »	4,00 5,00 —14,50 —22,00	— 8,00 —10,00 + 1,50 6,00	12,00 15,00 16,00 28.00	Avec une telle pièce, il est très difficile d'obtenir des déformations symétriques et de les maintenir dans des limites voulues.

augmentation du diamètre primitif intérieur et une faible réduction du diamètre primitif extérieur, dues principalement à la formation de pellicules d'oxyde qu'il faut enlever.

Si le diamètre est grand, la section de l'anneau petite, on peut ne chauffer que partiellement et se dispenser de refroidir dans l'eau.

Les éléments des essais du tableau n° 36 indiquent entre quelles limites peuvent se tenir les déformations, qui sont plus ou moins régulières suivant les températures de chauffage et de refroidissement.

Ce procédé ne saurait être préconisé que pour des petites pièces de serrage, les conditions de réussite pour les pièces de grand diamètre sont très difficiles à réaliser et ne donnent pas de résultats comparables à ceux des pièces annulaires chauffées, puis refroidies sur la hauteur.

Trempe et recuit.

Le refroidissement rapide d'une pièce chauffée constitue le procédé appelé *trempe.*

Cette opération a une grande influence sur l'acier dont les propriétés physiques se modifient. La dureté est surtout augmentée, de même que la ténacité et l'élasticité.

Des trempes répétées améliorent la qualité des aciers fondus, forgés ou coulés sous forme de pièces d'emploi direct.

Le *recuit* consiste à chauffer modérément une pièce et à la laisser refroidir lentement.

Cette opération s'applique particulièrement aux pièces fortement martelées, écrouies par le travail d'étirage à froid, afin de rendre au métal sa malléabilité.

La trempe et le recuit se combinent parfois de manière à faciliter la première opération, qui doit se faire à des températures déterminées faciles à apprécier sur recuit par l'aspect de la surface.

La trempe comporte pour l'acier divers degrés d'action qui

dépendent de la nature du métal, de la température de chauffage, de celle du refroidissement et de la rapidité de l'opération (1).

Lorsque la trempe est faite sur des pièces cémentées au sortir du four, on ne saurait entamer le métal avec des outils coupants, et si ces pièces exigent des façons complémentaires par enlèvement de matière, il est nécessaire de les détremper et de les recuire à haute température.

S'il s'agit d'obtenir un recuit partiel isolé, comme, par exemple, de recuire l'endroit où il faut percer un trou dans une plaque de blindage trempée, on opère dans de bonnes conditions au moyen d'un courant électrique assez intense pour faire disparaître la trempe.

On emploie des appareils à touches sphériques limitant le contact à une étendue de $0^{m2},02$ à $0^{m2},03$.

Les touches traversées par un courant de 10.000 ampères sont déplacées sur la zone à recuire qui est portée à la température du rouge cerise.

On règle le courant à volonté de manière que le refroidissement se fasse lentement, sinon la masse métallique absorbant rapidement le calorique déterminerait une nouvelle trempe.

On recuit de même les zones de découpage des plaques qui doivent être évidées. Les touches du courant sont déplacées à la vitesse de 5 à 6^{mm} par minute sur les surfaces des parties à adoucir.

---

(1) Dans une note, présentée par M. Troost. à l'Académie des sciences, séance du 4 novembre 1895, M. Osmond indique que si l'on prend une barrette d'acier cémenté dont la teneur en carbone varie d'une façon continue (soit de 0,35 à 1,70 0/0) d'une extrémité à l'autre, et que l'on fasse subir une trempe très énergique, on constate qu'une aiguille à coudre raye une coupe polie dans les régions les plus douces jusqu'à la teneur de 0,70 0/0 environ; puis la strie s'interrompt; mais, contrairement à toutes les idées reçues, elle réapparaît quand la teneur en carbone dépasse environ 1,30 0/0.

Les essais font ressortir diverses modifications de nature du métal apportées par la trempe, qui donne lieu à des points critiques de ductilité et de dureté que doit connaître le forgeron, et qui pourraient peut-être expliquer certaines causes de ruptures qui se produisent pendant le travail de forgeage des pièces d'acier. Un fragment de plaque de blindage cémenté par le procédé tout récent de M. Demenge (coulée de l'acier doux dans une lingotière à parois carburantes) a aussi été essayé par M. Osmond.

Double trempe.

Le procédé de la double trempe, très souvent employé pour tremper les outils tels que burins, forets, tarauds, fraises, etc., consistant à tremper d'abord au delà de la dureté nécessaire, puis à faire recuire, revenir la pièce à une température modérée pour la tremper de nouveau définitivement, donne au métal une dureté et une élasticité, une résistance au choc beaucoup plus grande que lorsque l'acier est simplement forgé et recuit, ou trempé d'un seul coup. Ce procédé est applicable aux crampons, chevilles, clavettes, fers à cheval, chaînes, essieux, arbres, bandages, projectiles, canons, plaques de blindage, etc. Il améliore la qualité des aciers doux ou durs. Il convient d'opérer avec quelques précautions, sinon il pourrait donner lieu à des défauts difficiles à constater.

La trempe s'applique principalement à l'acier depuis les temps les plus reculés. Elle joue un rôle important dans certaines préparations métallurgiques de ces vingt dernières années pour modifier les propriétés mécaniques de ce métal.

Les procédés de trempe varient avec le genre de pièces, le mode de chauffage, le bain de trempe et les soins que comporte la pièce.

Nous n'avons pas, ici, à considérer les pièces dites d'ajustage ni les outils de coupe. Nous n'avons pas, non plus, à signaler les moyens physiques d'apprécier les températures du métal et du bain. Rappelons simplement que les pièces sont chauffées au rouge sombre ou au rouge cerise, puis elles sont plongées dans un bain d'eau, d'huile, de suif ou de plomb, en prenant, lorsqu'il s'agit de grosses pièces, les mesures nécessaires pour que le bain conserve une température voulue, soit en lui donnant un volume suffisant, dix à trente fois celui de la pièce, soit en ajoutant au bain, au moment de la trempe (1).

(1) Vers 1799, M. Parkes trempait les instruments coupants en se servant d'un bain d'huile ou de métal fusible ; « il paraît qu'avec ce moyen on obtient une plus grande uniformité dans la trempe de l'acier. » — David Hartley se

Nous indiquerons, dans la fabrication des pièces, les procédés particuliers y relatifs.

Répétition des trempes et des recuits.

En ce qui concerne la répétition des trempes douces à l'huile et des recuits successifs, il est reconnu que la qualité de l'acier fondu, forgé ou moulé, est améliorée en ce qui concerne l'élasticité, la ductilité et la ténacité. Pour les aciers doux et demi-durs, une trempe au rouge cerise clair détermine la transformation du grain, une deuxième trempe au rouge sombre réduit la dureté à la valeur recherchée. Dans ces conditions, une barrette d'acier doux accusant une limite d'élasticité de 20^{kg} à l'état initial, donne après trempe 31^{kg}; un acier demi-dur accuse respectivement 26^{kg} et 44^{kg}. Il s'ensuit que le métal présente une plus grande résistance aux actions vives; au choc il est moins fragile.

Mais, cette trempe n'est pratique que pour des pièces de formes simples à sections régulières, sinon il se produit des cassures aux angles et dans les parties de faible épaisseur.

Il faut opérer avec beaucoup d'attention, autrement ces opérations ont plus d'inconvénients que d'avantages et leur effet sur les fortes épaisseurs est très relatif.

Les recherches montrent que l'acier est bien traité ou mal traité entre les températures de 850° C. et 665° distantes seulement de 185°. Or, les températures de chauffage et du recuit étant ordinairement jugées avec des moyens peu sûrs, il n'est pas étonnant que les différences d'appréciation déterminent des états défectueux du métal.

---

faisait breveter à la même époque pour une méthode de tremper l'acier à l'aide d'un pyromètre ou thermomètre appliqué près de la surface de l'objet; il recommande aussi l'usage de l'huile chaude, « dans laquelle, suivant lui, plusieurs douzaines de rasoirs ou autres ustensiles peuvent être trempés en même temps; le degré de chaleur exigé pour différents articles étant déterminé d'après l'expérience ». (*Journal de Nicholson*, vol. I.)

Le procédé des trempes répétées a été appliqué aux pièces en acier par MM. Walrand et Cottin, au Creusot, dès 1841.

La trempe a le grave inconvénient de rompre la stabilité moléculaire du métal, de développer de fortes tensions internes produisant des déformations extérieures, des cassures, des ruptures au moment du refroidissement ou à la suite de faibles chocs.

Le changement brusque de température détermine des variations dans l'ordre de combinaison, ou des modifications allotropiques marquées par le curieux phénomène de la recalescence.

Pendant le refroidissement, le métal extérieur se contracte sur un noyau encore chaud qui, étant incompressible, ne laisse d'autre alternative à la partie extérieure que de s'allonger ou de se rompre si la ténacité n'est pas égale à l'effort.

Dans certains cas, le métal présente des périodes critiques de fragilité, il suffit de la plus légère variation de température, du plus léger choc pour déterminer une rupture plus ou moins bruyante.

C'est ce qui se produit parfois en transportant les frettes, les tubes de canons, bien que ceux-ci soient en acier ductile et tenace, et que la trempe ait lieu à l'huile.

Pour rétablir l'équilibre, il faut recuire l'acier à la température de 500° et le laisser refroidir lentement.

Mais, si la trempe a occasionné des fissures, si petites qu'elles soient, aucun traitement ultérieur ne peut les faire disparaître; et c'est là le grand danger de la trempe, même à l'huile.

Les tensions de cette trempe douce sont d'autant plus considérables dans certaines pièces que les formes sont plus irrégulières.

Elle a aussi pour effet de raccourcir la longueur de la pièce; on a constaté des raccourcissements de 12^{mm} sur 9^{m} de longueur, soit de $\frac{12}{9.000} = 0^{m},0013$ par mètre.

Le recuit ne semble pas avoir pour action de lui rendre sa longueur primitive, de sorte que les tensions de dilatation et

de contraction combinées qui se produisent pendant la trempe déterminent des allongements élémentaires permanents assez prononcés et que ne pourrait supporter un acier dur ou peu ductile sans craindre les fissures transversales ou longitudinales.

La trempe des tubes, tels que ceux des canons, se fait encore en les refroidissant par l'intérieur au moyen d'une circulation de fluide réfrigérant, et l'on peut aussi opérer en réchauffant l'extérieur pendant que l'intérieur est refroidi par un courant d'huile ou d'eau, ce qui caractérise le procédé Rodman.

Ces trempes peuvent se faire à diverses reprises, à haute et à basse température, soit entre 900° et 600°.

Les bains à composition spéciale (bain de M. Burin, par exemple) permettent de tremper dur tout en assurant une grande élasticité et une grande résistance ; ces bains, que l'on utilise pour la trempe sans revient des outils de coupe, conviendraient tout particulièrement pour les pièces d'acier doux ou demi-dur dont on veut améliorer les propriétés mécaniques par une ou plusieurs trempes à basse température.

Trempe par compression.

La compression des métaux à chaud avec refroidissement sous pression donnant lieu à une trempe partielle a été préconisée en vue de l'amélioration de la qualité des aciers coulés sous forme de pièces mécaniques (1).

L'acier chauffé au rouge cerise est soumis à une compression énergique de 10 à 30^{kg} par millimètre carré, entre deux pièces métalliques dont le contact a pour effet de produire une chute de température durcissant le métal sans trop lui faire perdre de sa ductilité tout en lui communiquant plus de ténacité et d'élasticité, propriétés qui s'accentuent par un ou plusieurs réchauffages correspondant à des compressions successives.

Ce procédé peut s'appliquer aux pièces matricées telles que roues de wagons, essieux, fers à cheval, broches, etc.

(1) Brevet du 23 janvier 1882, par M. Clémandot.

On peut aussi considérer le martelage et le laminage à froid comme une sorte de trempe par compression déterminant ce que l'on appelle l'écrouissage, et qui a pour but de serrer les molécules, d'en augmenter la dureté superficielle. L'opération est quelquefois poussée à outrance, s'il est utile d'obtenir le maximum d'écrouissement, par exemple, pour des petites pièces en acier dont on veut prévenir l'usure rapide. On a aussi appliqué l'écrouissage par martelage aux fusées des essieux de wagons, on le préconise pour les plaques tubulaires de cuivre des foyers de locomotives dans la partie tubée, en vue de leur assurer plus de rigidité et de résistance ; les applications ont montré que la percussion donne de meilleurs résultats que la pression lente.

C. CODRON
(Châl. 1867).

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE

TABLE DES MATIÈRES DE LA PREMIÈRE PARTIE

Dédicace v
Avant-propos 1
Procédés de forgeage 2

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE I

I. — Procédés généraux d'action des outils 6
Classification 7
II. — Procédés par pression directe lente 6
Compression des métaux à chaud et à froid en masse 8
Efforts de compression 9
Énergie de compression 10
III. — Compression centrifuge 14
Pression développée et énergie dépensée 15
IV. — Pressions partielles transversales et longitudinales 21
V. — Essais de compression directe 24
Influence de la vitesse 27
Importance des hautes températures 34
Valeurs des résistances à la déformation par compression des métaux forgés à différentes températures 35
Importance de la ductilité 37
VI. — Engins de pressage. Presse de Haswell, de Whitworth, de Davy, de Breuer et Schumacher, de Henry Berry 41

CHAPITRE II

I. — Procédés par pression vive. Martelage 51
Loi générale de similitude du martelage 56
Influence de la masse et de la vitesse du marteau 58
Éléments de l'énergie mécanique du marteau 60
Rendement de la percussion 63
II. — Essais de chocs 64
Essais avec tige enfoncée dans une bague 65
Essais comparatifs de choc et de compression 69
Essais de chocs répétés sur divers métaux à froid et à chaud. 83
Puissance relative du marteau et de la presse 138
III. — Engins de martelage 146
Marteaux mécaniques à organes rigides 146
Marteaux dits atmosphériques 149
Marteaux-pilons à vapeur 149
Marteaux-pilons divers 150
Marteaux hydrauliques 152

CHAPITRE III

I. — Applications générales des procédés de pressage et de martelage. 154
Maquetage. Cinglage 155
II. — Étirage. Influence de la forme des outils 160
Énergie dépensée pour l'étirage par pressions transversales . 165
Chassage. Platinage. Planage. Outils employés 167
III. — Refoulage 172
IV. — Mandrinage 179
V. — Étampage 182
VI. — Matriçage 188
Engins de matriçage et d'étampage en bout 191
VII. — Rivetage. Matage 193
Outils de rivetage 194
Essais de rivures faites à froid ou à chaud 196
Pression de rivetage 200
Machines à river 208
Chauffage électrique des rivets 223

VIII. — Procédés de soudage 226
Soudures diverses 227
Soudures électriques 240
Brasage 248
IX. — Perçage 251
Essais de pénétration 254
X. — Coupage. Tranchage. Cisaillage 256
Outils de tranchage 258
Cisailles à levier, à guillotine 259
Cisailles circulaires 261
Cisailles multiples pour fendage 263
Essais de tranchage et de cisaillage 264
Cisaillage d'un seul coup 266
Cisaillage progressif 269
Sciage 279
Taillage et moletage 281

CHAPITRE IV

I. — Procédés de laminage 283
Laminage longitudinal. Disposition des cylindres 283
Modèles de laminoirs anciens et modernes 288
Laminage sur plat et sur champ 292
Laminage à empreintes 294
Laminage intermittent, continu, sans fin 298
Déformations de laminage entre cylindres lisses 301
Énergie dépensée par le laminage ordinaire 309
Essais de laminage longitudinal 330
II. — Laminage transversal ou roulage 345
Roulage entre plateaux 350
Machines à rouler de Martin, de Simonds 351
Roulage entre disques tournants 357
Roulage entre cylindres 358
Roulage et chauffage électrique simultanés 360
III. — Laminage hélicoïdal entre cylindres 362
Application au filetage 366
Fileteuses de Simon, de Dorman 367
Laminage hélicoïdal entre disques ou plateaux 370
Laminoir universel de Reinhard-Mannesmann 376
Emploi de mandrins dits nez de laminage pour tubes, pièces diverses 380

CHAPITRE V

I. — Procédés par traction directe 398
Redressage. Machine à redresser les tôles par traction . . . 398
Procédés par traction et compression combinées 399
Étirage au mandrin 400
Étirage et laminage simultanés 402
Bancs à tirer 403
Calcul des éléments du travail d'étirage 404
Cas d'un mandrin à raccord torique 404
Cas d'un mandrin à raccord conique 417
Essais d'étirage au mandrin-filière 428

CHAPITRE VI

I. — Procédés par flexion. Ployage, courbage 453
Essais de ployage 454
Coudage 459
Cintrage, roulage, envirolage 463
Machines à cintrer les barres 467
Machines à cintrer les tôles, modèles à cylindres horizontaux ou verticaux 470
Cintrage au mandrin 475
Cintrage des galbords, des tubes 475
Calcul des éléments du travail de cintrage 479
Essais de cintrage 496
Dressage ou planage; machines à dresser 500
Enroulage 504
Pliage, bordage, machines à border 506
Retreignage 507
Sertissage 508
Estampage, emboutissage au marteau, en étampes 512
Machines à emboutir 525
Essais d'emboutissage 528
Repoussage 532

CHAPITRE VII

I. — Procédés par torsion 536

CHAPITRE VIII

I. — Chauffage et refroidissement 538
Essais de retreignage par chauffage et refroidissement . . . 541
Trempe et recuit 542
Double trempe 544
Répétition des trempes et des recuits 545
Trempe par compression 547

PLANCHES

Numéros
Presse hydraulique à forger, modèle Whitworth 1
— — modèle Davy 2
— — modèle Breuer-Schuhmacher 3
Épure des essais comparatifs de choc et de compression 4
— — — 5
— — — 6
Marteaux mécaniques à bras 7
— — à bascule 8
Marteaux-pilons mécaniques 9
— atmosphériques 10
— à vapeur 11
— — modèles divers 12
— hydrauliques 13
Outils de planage 14
Étampes et matrices diverses 15
Machines à étamper 16
Engins d'étampage et de matriçage 17
Outils de rivetage et de matage 18
Machines à river à organes rigides 19
— à vapeur 20
Riveuses hydrauliques 21
Riveuse hydraulique à compresseur direct, modèle Delaloe-Piat . . . 22
Riveuses mobiles 23
Cisailles à levier 24
Cisailles à guillotine 25
Cisailles hydrauliques 26
Cisailles circulaires 27
Essais de tranchage et de cisaillage 28

Scieries circulaires pour découpage à chaud 29
Laminoirs (modèles anciens) 30
Laminoirs divers 31
Essais de laminage, épures 32
Machines à rouler et à laminer transversalement de Martin, de Simonds. 33
— de Jeuhomme, de Burton. 34
Fileteuses et laminoirs hélicoïdaux de Reinhard-Mannesmann. . . . 35
Bancs à tirer 36
Presses à ployer, ... 37
Machines à cintrer les barres. 38
— les tôles (types horizontaux) . . . . . 39 et 40
— — (types verticaux) 41
Machines à planer et à dresser les tôles 42
Machines à plier et à border 43
— — 44
Pièces embouties ou estampées et outils d'emboutissage. 45
Machines à estamper et à emboutir 46
Presses hydrauliques et à vapeur à emboutir, tours à estamper . . . 47

IMPRIMERIE CENTRALE DES CHEMINS DE FER.
IMPRIMERIE CHAIX, RUE BERGÈRE, 20, PARIS. — 1244-1-96. — (Encre Lorilleux).